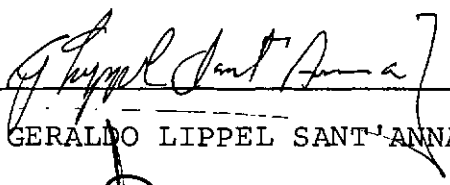


USO DE TRAÇADORES NA MODELAGEM DE UNIDADES  
DE AERAÇÃO E DECANTAÇÃO EM ESTAÇÃO  
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

JOSÉ HOMERO PINHEIRO SOARES

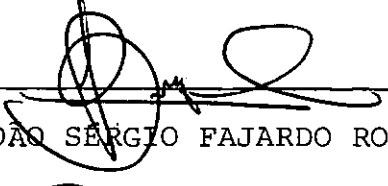
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS  
DE PÓS GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA  
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:



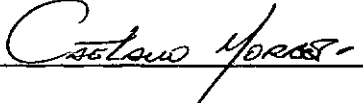
---

PROF. GERALDO LIPPEL SANT'ANNA JR.



---

PROF. JOÃO SÉRGIO FAJARDO ROLDÃO



---

PROF. CAETANO MORAES



---

PROF. PAULO CANEDO DE MAGALHÃES

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 1985

SOARES, JOSÉ HOMERO PINHEIRO

Uso de Traçadores na Modelagem de Unidades de Aeração e Decantação em Estação de Tratamento de Esgotos. (Rio de Janeiro) 1985

ix, 100 p. 29,7 cm (COPPE-UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1985)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1 - Análise Hidrodinâmica I. COPPE/UFRJ  
II. Título

Aos meus pais, Nelson e Zely,  
meus irmãos, e esposa  
Elizete.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Geraldo Lippel pela orientação e eficiente deste trabalho e solicitude com que sempre nos atendeu.

Ao professor João Roldão pelo grande apoio e incentivo.

Ao CNPq pela concessão de uma bolsa de estudos

A Engenheira Ângela e todos os outros responsáveis pela Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador que sem qualquer empecilho permitiram a realização de todas as experiências de campo naquele local.

Ao senhor Emygdio Pereira, e toda equipe do Laboratório de Traçadores da COPPE-UFRJ, sem a qual seria impossível a realização deste trabalho.

A meus pais pelo interesse com que acompanharam meus estudos.

A Elizete, esposa e companheira, que com todo carinho e compreensão nos acompanhou durante esta pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

USO DE TRAÇADORES NA MODELAGEM DE UNIDADES DE AERAÇÃO  
E DECANTAÇÃO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

José Homero Pinheiro Soares

JUNHO DE 1985

Orientador: Prof. Geraldo Lippel Sant'Anna Junior

Programa: Engenharia Civil

A análise de propriedades e características de sistemas reais tem sido utilizada empregando-se amplamente a técnica de estímulo-resposta. Tal técnica foi utilizada neste trabalho provocando um estímulo do tipo Delta de Dirac à entrada de dois tanques de aeração e um decantador secundário de uma estação de tratamento de esgotos do tipo lodo ativado convencional. Utilizou-se para tanto o traçador fluorescente Amidorodamina G Extra e o traçador radioativo Bromo-82. O comportamento hidrodinâmico das unidades consideradas foi analisado através da modelagem teórica das curvas-resposta dos equipamentos. Os modelos de escoamento que melhor se ajustaram às curvas experimentais são consagrados na literatura técnica.

Apresenta-se um procedimento para se detectar a influência de sólidos em suspensão sobre a fluorescência do traçador Amidorodamina G Extra.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Sciences (M.Sc.).

USE OF TRACERS IN MODELLING AERATION AND  
SEDIMENTATION UNITS IN A SEWAGE TREATMENT PLANT

José Homero Pinheiro Soares

JUNE, 1985

Chairman: Prof. Geraldo Lippel Sant'Anna Junior  
Department: Civil Engineering

Analysis of properties and characteristics of real systems have been performed using the stimulus response technique. A Dirac's Delta stimulus was introduced at the inlet of two aeration tanks and a secondary sedimentation basin of a conventional activated sludge sewage treatment plant.

Amidorhodamine G Extra and Bromine-82 were used as fluorescent and radioactive tracers.

The hydrodynamic behaviour of both units were analysed through the comparison of experimental response curves with well known models.

A procedure to determine the influence of suspended solids on fluorescence of the Amidorhodamine G Extra tracer is presented.

ÍNDICE

## I. INTRODUÇÃO

I.1 Sistemas de Lodos Ativados.....	01
I.2 Objetivos do Trabalho .....	02

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MODELAGEM TEÓRICA

II.1 Introdução.....	04
II.1.1 Noções Básicas.....	04
II.1.2 Modelos Ideais de Escoamento.....	07
II.2 Revisão de Literatura.....	10
II.2.1 Traçadores comumente empregados em estudos hidrodinâmicos.....	21
II.3 Modelagem Teórica.....	23
II.3.1 Generalidades.....	23
II.3.2 Noções de Função de Transferência.	23
II.3.3 Modelos Teóricos.....	24

## III. MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 Escolha do Traçador.....	29
III.2 Unidades de Tratamento Estudadas.....	32
III.2.1 Dimensões dos Equipamentos.....	32
III.2.2 Decantador Secundário - Perfil de Concentração de Sólidos.....	33
III.3 Atividades Experimentais Realizadas em Campo.....	39

III.3.1 Preparo, Injeção e Manipulação do Traçador Fluorescente.....	39
III.3.2 Preparo, Injeção Conjunta e Manipulação dos Traçadores Flu orescente e Radioativo.....	40
III.3.3 Medidas de Vazão.....	43
III.3.3.1 Vazão de Reciclo de Lo do Ativado.....	43
III.3.3.2 Vazão de Esgotos Afluen tes.....	45
III.4 Metodologia Seguida em Laboratório...	46
III.4.1 Preparo e Manuseio das Amos tras.....	47
IV. RESULTADOS OBTIDOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO	
IV.1 A Proposição Inicial e o Encaminhamen to Seguido.....	52
IV.2 Curvas Experimentais e Modelagem Teó rica.....	60
IV.2.1 Tanques de Aeração.....	65
IV.2.2 Sistema de Decantação Secundã rio.....	72



V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
APÊNDICE I.....	89
APÊNDICE II.....	96

# C\_A\_P\_Í\_T\_U\_L\_O I

## INTRODUÇÃO

### I.1 Sistemas de Lodos Ativados

O processo de lodos ativados convencional consiste basicamente em se submeter esgotos brutos ou pré-decantados à aeração artificial nos chamados Tanques de Aeração (TA), após o que o fluido é encaminhado a um Decantador Secundário (DS) que promove a decantação do lodo ativado, que consiste de uma flora heterogênea de microorganismos na forma de flocos. A finalidade da aeração é introduzir e homogeneizar na massa líquida o oxigênio do ar atmosférico, mantendo uma agitação constante a fim de promover o contato entre o esgoto e os flocos bacterianos, impedindo-se a sua sedimentação.

Parte do lodo ativado decantado no DS retorna aos TA a fim de manter uma concentração ótima no interior destes para a degradação mais eficaz da matéria orgânica alí e existente. O excesso de lodo no interior do DS é encaminhado aos digestores anaeróbios.

As funções das demais unidades componentes de uma estação de tratamento de lodo ativado, tais como gradeamento, caixa de areia, digestores, leitos de secagem não se

rão destacadas por serem clássicas e fugirem do escopo deste trabalho.

## I.2 Objetivos do Trabalho

O uso de traçadores para a avaliação do comportamento hidrodinâmico de estações de tratamento de esgotos é pouco difundido no Brasil.

O presente estudo compreende a análise das curvas-resposta de dois tanques de aeração, do decantador secundário e reciclo de lodos da Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador - ETIG - Rio de Janeiro, do tipo lodo ativado convencional, ao se provocar um estímulo do tipo Delta de Dirac à entrada destes equipamentos. Utilizou-se para avaliação das curvas experimentais o traçador fluorescente Amidorodamina G Extra na totalidade das experiências de campo realizadas, e o traçador radioativo Bromo-82, injetado simultaneamente com aquele traçador em uma das experiências.

O conjunto, decantador secundário e linhas de reciclo de lodo foi denominado, neste trabalho, sistema de decantação. Este sistema, foi subdividido em dois subsistemas a saber: subsistema da fase sobrenadante e subsistema da fase lodo ativado e linhas de reciclo. O objetivo desta subdivisão foi analisar separadamente o comportamento hidrodinâmico do líquido sobrenadante no interior do decantador secundário, e do lodo ativado existente no sistema de decantação.

As curvas-resposta das unidades de tratamento citadas, foram analisadas através de modelos de escoamentos

comumente encontrados na literatura.

Foi feita a comparação das curvas experimentais dos tanques de aeração obtidas com injeção dos traçadores fluorescente e radioativo, com o objetivo de se verificar a existência de diferenças consideráveis entre ambas.

Assim tentou-se avaliar a confiabilidade do traçador fluorescente quando utilizado para marcar escoamentos com forte carga de sedimentos em suspensão, supondo-se que o traçador radioativo utilizado não se adsorva em partículas sólidas, uma vez que sua fórmula química - Brometo de Potássio - é estável e pouco sensível à adsorção.

Fez-se a comparação de todas as retas de calibração obtidas com amostras de esgotos, com retas de calibração tendo como diluente, água destilada. O objetivo desta comparação, foi verificar a influência dos sólidos em suspensão sobre a fluorescência.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MODELAGEM TEÓRICA

#### II.1 INTRODUÇÃO

##### II.1.1 NOÇÕES BÁSICAS

A técnica de estímulo-resposta tem sido amplamente usada em ciência para análise de propriedades e características de sistemas reais. Tal técnica consiste em se perturbar o sistema à sua entrada e verificar como ele responde a tal perturbação. A perturbação do sistema em sua entrada, denomina-se estímulo, e o resultado medido à sua saída, denomina-se resposta.

Em nosso problema o estímulo corresponde a uma injeção de traçador na corrente de fluido que entra, enquanto que a resposta, é um registro do traçador que deixa o recipiente, com o tempo.

Qualquer material que possa ser detectado à saída do sistema, e que não perturbe o escoamento no recipiente pode ser usado como traçador. Pode-se usar qualquer tipo de estímulo de entrada - casual, periódico, degrau ou pulso.

Estes sinais são mostrados na figura (2.1)

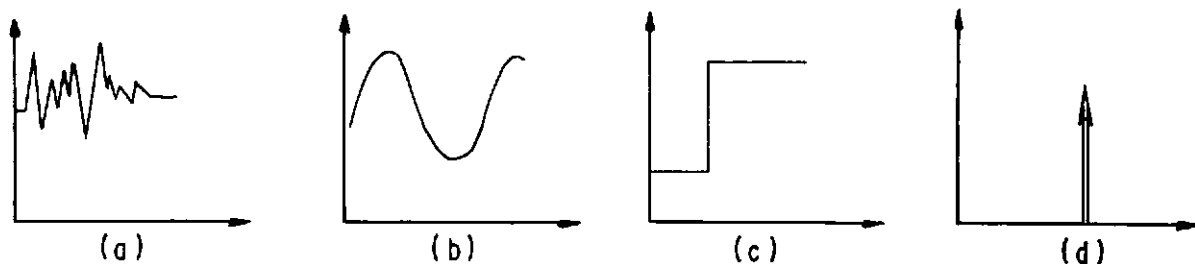


FIGURA 2-1 - (a) sinal casual (b) sinal periódico  
(c) sinal em degrau (d) sinal pulso

Embora as mesmas informações possam ser retiradas de qualquer um destes tipos de sinais, consideraremos apenas os dois últimos tipos, uma vez que há maior simplicidade de serem tratados.

O sinal em degrau, é também denominado injeção contínua, e o sinal pulso, injeção delta de Dirac ou pulso instantâneo unitário.

Se for aplicada à entrada de um recipiente uma injeção contínua (degrau unitário) (fig. 2.1 (c)), a resposta do sistema a este sinal é denominada Curva F. Caso a injeção seja instantânea, a curva-resposta denomina-se curva C.

As curvas-resposta podem ser adimensionalizadas bastando para isto, dividir-se as concentrações medidas por  $C_0$ , onde  $C_0$  é a relação entre a massa de traçador injetada dividida pelo volume de fluido no recipiente.

Os tempos são adimensionalizadas dividindo-os por  $T$ , que é o tempo médio de residência operacional, dado

pela razão entre o volume de fluido no equipamento considerado e a vazão média.

A curva  $C(t)$ , resposta a um estímulo pulso pode ser normalizada em relação às variáveis concentração e tempo, resultando a curva  $E(\theta)$  que representa a distribuição dos tempos de residência do fluido no recipiente ou equipamento.

A análise da curva-resposta é que fornecerá indicações importantes sobre o escoamento no interior do equipamento estudado.

A figura (2.2) mostra as curvas  $F$  e  $C$  típicas de um recipiente real.

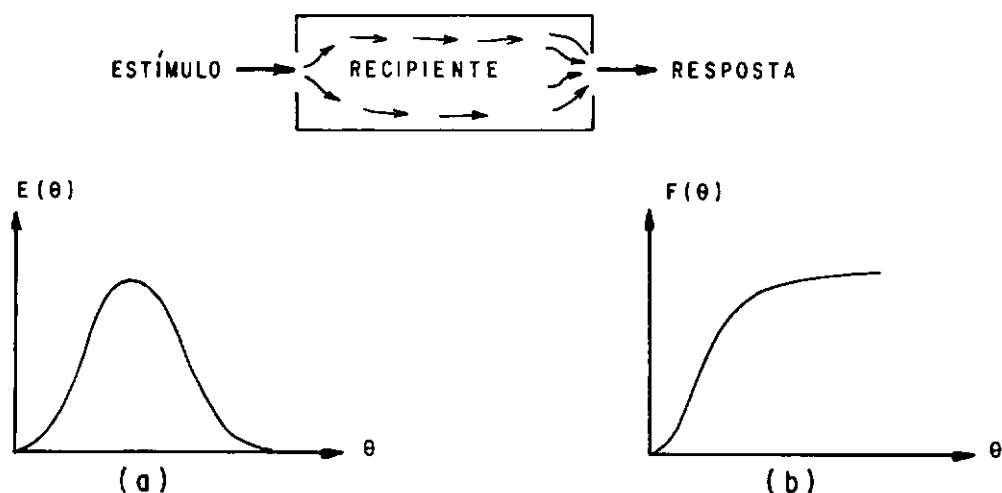


FIGURA 2-2 (a) resposta à injeção instantânea  
(b) resposta à injeção contínua

## II.1.2 MODELOS IDEAIS DE ESCOAMENTO

Dois modelos teóricos ideais são comumente encontrados na literatura. São eles:

- 1 - Modelo de escoamento pistão, ou tubular ("plug-flow")
- 2 - Modelo de mistura perfeita ou ("CSTR")

Um reator com escoamento tubular é definido como aquele no interior do qual todas as moléculas do fluido atravessam-no com a mesma velocidade, permanecendo aí durante um mesmo tempo  $t$ . Não há mistura por dispersão axial.

Um equipamento cujo escoamento se dá com mistura perfeita é aquele cuja composição do fluido em seu interior é totalmente uniforme.

As expressões para as curvas  $E(\theta)$  de um escoamento pistão e de um escoamento em mistura perfeita são dadas respectivamente pelas seguintes equações:

$$E(\theta) = \delta(\theta - 1) \quad (\text{II.1})$$

$$E(\theta) = e^{-\theta} \quad (\text{II.2})$$

onde a função  $\delta(\theta - 1)$  é denominada função delta de Dirac e é definida como segue:

$$\delta(\theta - 1) = \begin{cases} 0 & \text{para } \theta \neq 1 \\ \infty & \text{para } \theta = 1 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{tal que } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\theta - 1) = 1 \quad (\text{II.4})$$



No caso da função  $F(\theta)$  para escoamento pistão e em mistura perfeita, as equações são respectivamente as seguintes:

$$F(\theta) = U(\theta - 1) \quad (\text{II.5})$$

$$F(\theta) = 1 - e^{-\theta} \quad (\text{II.6})$$

$$\text{onde } U(\theta - 1) = \begin{cases} 0 & \text{para } \theta < 1 \\ 1 & \text{para } \theta \geq 1 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

A curva real se afasta destes dois modelos ideais de escoamento seja porque o fluido segue por caminhos preferenciais no interior do equipamento, caracterizando o que se denomina curto-circuito, seja porque existem regiões mortas ou estagnantes dentro do tanque.

Regiões mortas de um equipamento são aquelas que o traçador injetado não tem acesso.

Nas regiões estagnantes o traçador injetado tem acesso, mas é lentamente renovado neste local.

A figura 2.3 mostra as curvas  $E(\theta)$  e  $F(\theta)$  para o caso dos escoamentos ideais e do escoamento real.

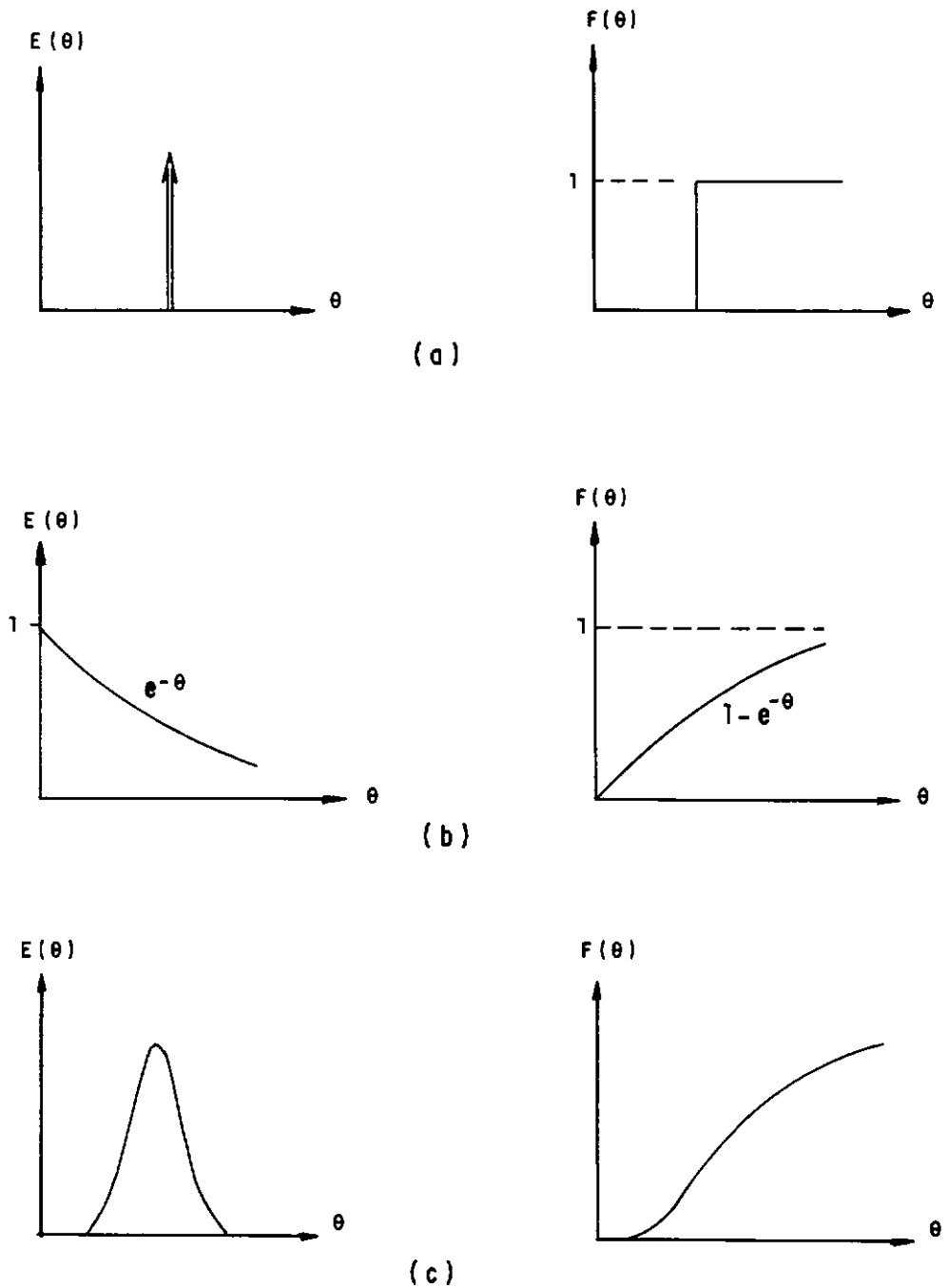


FIGURA 2-3 - (a) escoamento tubular (b) escoamento em mistura perfeita, (c) escoamento real

Não se pretende neste texto cobrir todos os aspectos relevantes ligados a modelos de escoamento. Trabalhos de talhados da literatura foram realizados por ROUSTAN (1), LEVENSPIEL (2) e HIMMELBLAU e BISCHOFF (3) entre outros.

## II.2 REVISÃO DE LITERATURA

Muitos artigos técnicos têm sido escritos a respeito do comportamento hidrodinâmico de fluidos em reatores biológicos, e os fatores que influem neste comportamento.

Frequentemente os autores destes estudos têm tentado ajustar as curvas-resposta obtidas às equações teóricas (modelos teóricos). Estas curvas-resposta experimentais são obtidas em geral, de reatores biológicos em escala industrial, ou de modelos físicos reduzidos, em escala de laboratório.

Os principais trabalhos de modelagem hidrodinâmica de equipamentos típicos de estações de tratamento de esgoto são comentados a seguir.

ELMALEH e BEN AIM (4) obtiveram as curvas-resposta de um tanque de aeração de  $12 \text{ m}^3$  munido com difusores de ar. As curvas-resposta foram resultados da injeção instantânea do traçador fluorescente RODAMINA-B. Um modelo de dois tanques em série perfeitamente agitados de volumes diferentes foi empregado para ajustar os resultados experimentais. Tal ajuste se mostrou muito satisfatório.

MURPHY e TYMPANY (5) usando o traçador fluorescente RODAMINA LISSAMINE B-200 estudaram em laboratório um modelo de um tanque de aeração. As curvas-resposta foram obtidas através de injeção instantânea do referido traçador.

Além dos testes promovidos em laboratório, MURPHY e TYMPANY (5) realizaram testes em um tanque de aeração protótipo. O ajuste da curva experimental às equações teóricas foi tentado. Usou-se para isto os seguintes modelos:

Dispersão Axial, Tanques em Série Perfeitamente Agitados de Volumes Iguais e de Volumes Diferentes. O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Dispersão Axial. O valor do número de dispersão ( $D/UL$ ) que conduziu ao melhor ajustamento foi 0,85. Para o modelo de Tanques em Série Perfeitamente Agitados de volumes iguais, obteve-se um valor de  $N$  (número de tanques em série) igual a 1,43. Este valor encontrado para  $N$ , não tem representatividade física uma vez que o número de tanques em série deveria ser inteiro. Não há como imaginarmos as regiões no interior do equipamento representadas pelo valor 1,43.

O modelo de Dispersão Axial baseia-se na hipótese de um escoamento tubular com um certo grau de mistura entre os diferentes elementos de fluido em escoamento. Esta dispersão pode ser causada pela turbulência do líquido.

DANCKWERTS (6) em 1953, sugeriu que a distribuição de traçador dentro de um reator poderia ser representada pela equação diferencial clássica da difusão, aplicando-se à sua solução a seguinte mudança de variável:

$$x = L - ut \quad (II.8)$$

onde:  $x$  = distância

$u$  = velocidade do escoamento

$L$  = comprimento do reator

$t$  = tempo

A equação diferencial da difusão é dada pela seguinte expressão:

$$dC/dt = D \cdot d^2C/dx^2 \quad (II.9)$$

onde:

- C - concentração de traçador
- D - coeficiente de dispersão axial
- t - tempo
- x - distância

O coeficiente de dispersão axial D, caracteriza o grau de mistura do escoamento.

DANCKWERTS (6) estabeleceu as condições de contorno associadas a equação (II.9) para um estímulo degrau unitário aplicado à entrada do reator, encontrando a solução da referida equação para as condições de contorno estabelecidas.

SANT'ANNA (7) desenvolveu um estudo detalhado das condições de validade do modelo de dispersão axial, resumindo as expressões de Distribuição de Tempos de Residência (DTR) para diversas condições de contorno do equipamento.

DANCKWERTS (6) afirma que quando o número de dispersão ( $D/UL$ ) for menor que 0,25 as condições de contorno por ele estabelecidas são asseguradas. Isto significa que o modelo de Dispersão Axial é válido para baixos graus de mistura. Tendo em vista esta proposição, concluímos que os resultados de MURPHY e TYMPANY (5) estão além dos limites recomendados por DANCKWERTS (6), com um alto valor do número de dispersão, correspondendo à situações de elevados graus de mistura.

FREDERICK e SANTOSHI (8) construíram um modelo reduzido de um tanque de cloração cujo fator de escala foi 1/8,43. Através da injeção instantânea do traçador fluorescen

te RODAMINA-WT à entrada do tanque , mediram as concentrações do traçador na saída, até que toda a massa de traçador fosse recuperada.

Alguns parâmetros obtidos das curvas-respostas de traçador para interpretação dos resultados foram empregados por estes autores.

$$\text{Índice de curto circuito: } \frac{t_i}{T} \quad (\text{II.10})$$

Índice de significância de tempo de detenção:

$$\frac{t_g}{T} \quad (\text{II.11})$$

Índice de tempo de detenção modal:

$$\frac{t_p}{T} \quad (\text{II.12})$$

Índice de dispersão Morril:

$$\frac{t_{90}}{t_{10}} \quad (\text{II.13})$$

Os símbolos utilizados têm o seguinte significado:

$t_i$  - tempo correspondente ao aparecimento inicial do traçador na corrente de saída

$T$  - tempo teórico de detenção

$t_g$  - tempo correspondente ao centro de gravidade da curva-resposta

$t_p$  - tempo correspondente à máxima concentração da curva-resposta

$t_{90}$  - tempo correspondente à recuperação de 90% da massa injetada

$t_{10}$  - tempo correspondente à recuperação de 10% da massa injetada

Estes índices têm confiabilidade relativa para a análise de dados obtidos com traçadores. Tais índices são obtidos das curvas-resposta e podem não representar quantitativamente o comportamento hidrodinâmico de reatores, uma vez que representam apenas alguns pontos da curva-resposta, ao passo que a maioria das informações obtidas da curva são negligenciadas. A resposta a um certo estímulo provocado à entrada do reator deve ser analisada como um todo, e não devemos representa-la apenas através de alguns pontos característicos.

FREDERICK e SANTOSHI (8) variando a vazão de alimentação do modelo, correlacionaram os diversos índices por eles propostos com as vazões correspondentes e calcularam que vazão de operação do modelo reduzido seria necessária para fornecer o mesmo índice do tanque protótipo quando este operasse à vazão de projeto.

Os autores concluíram que os parâmetros recomendados comumente para análises com dados obtidos da técnica estímulo-resposta, têm diferentes graus de confiabilidade, devendo ser usados com a devida cautela.

MURPHY e BORIS (9) estudaram um tanque de aeração real equipado com difusores de ar. As dimensões do reator escolhido foram 81,0 m de comprimento por 8,0 m de largura e

4,5 m de profundidade. Usou-se traçador fluorescente Rodamina B injetado instantaneamente na corrente de entrada do tanque.

O objetivo do estudo foi verificar o grau de mistura que ocorria no tanque analisado, e estabelecer suas possíveis consequências sobre a operação.

Para o cálculo do grau de mistura os autores utilizaram o número de dispersão associado ao tempo de pico da curva resposta.

O valor do número de dispersão ( $D/UL$ ) que proporcionou o melhor ajuste foi 0,786.

Observamos novamente o valor do número de dispersão superior ao limite fixado por DANCKWERTS (6).

A variação da vazão de alimentação, correspondente a uma variação de 4,8 horas para 13,3 horas no tempo de detenção  $\bar{t}$ , não afetou o valor do coeficiente de dispersão  $D$ . Mas, para tal variação de vazão o número de dispersão aumentou, uma vez que para qualquer reator é válida a relação:

$$u = L / \bar{t} \quad (\text{II.14})$$

e assim,

$$D / uL = D\bar{t} / L^2 \quad (\text{II.15})$$

sendo "u" a velocidade do escoamento e "L" o comprimento do reator.



O aumento da vazão de ar nos difusores provocou um aumento no coeficiente de dispersão segundo a equação empírica:

$$D = 1000 (Q_A)^{0,246} \quad (\text{II.16})$$

onde  $Q_A$  é a vazão de ar dada pelos difusores em  $\text{cm}^3/\text{min}$  e  $D$ , o coeficiente de dispersão em  $\text{ft}^2/\text{hr}$ .

No entender de MURPHY e BORIS (9) decréscimos na mistura, devido a diminuição da vazão de ar, no tempo de detenção, ou acréscimos no comprimento do tanque conduziram a desempenhos mais próximos do escoamento tubular, uma vez que o número de dispersão para tais casos seria reduzido. As principais conclusões dos autores foram as seguintes:

O modelo de dispersão axial descreve adequadamente as condições de mistura longitudinal de um tanque de aeração real com escoamento em espiral.

O grau de mistura existente em tanques de aeração operados com vazões de ar convencional é tal que eles tendem a aproximar-se das condições de mistura perfeita.

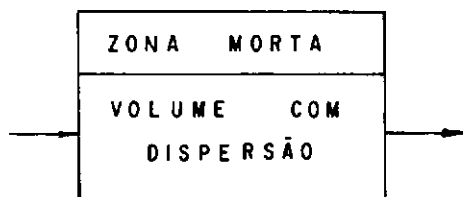
LESLIE (10) usando traçador fluorescente Rodamina B num tanque de sedimentação de laboratório de dimensões 1,6 m de comprimento por 0,91 m de largura e um fundo falso de forma a obter uma profundidade máxima de 0,76 m obteve as curvas-resposta de traçador representativas do escoamento existente no tanque. O traçador sólido Palespan 80 foi utilizado para simular as partículas sólidas existentes num sedimentador real.

A fim de modelar teoricamente as curvas experimentais, LESLIE (10) usou modelos de mistura, dividindo o sedimentador em volumes teóricos onde supôs a existência de comportamentos hidráulicos diferenciados para cada volume consi

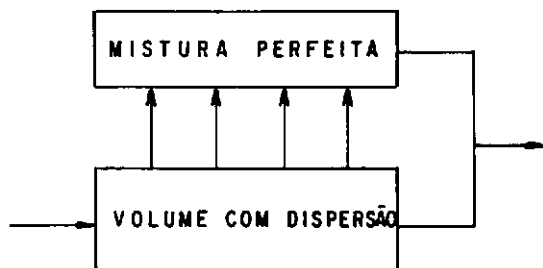
derado. A figura (2.4) representa os modelos usados por LESLIE (10).



MODELO A



MODELO B



MODELO C

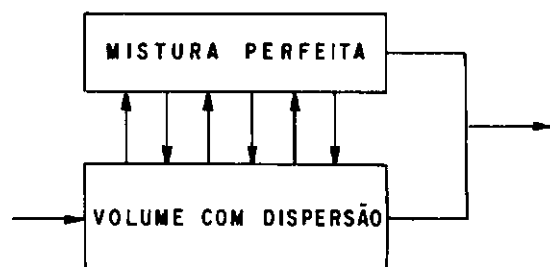


FIGURA 2-4 - Ilustração dos Modelos utilizados por LESLIE (10) e diagramas de Bloco Correspondentes

O modelo A previu uma curva de distribuição de traçador para baixas dispersões no volume com dispersão.

O modelo B foi o que melhor ajustou os dados experimentais, enquanto que o modelo C não ajustou bem os dados experimentais.

REBHUN e ARGAMAN (11) propuseram um método novo de análise de curvas-respostas de traçador e utilizaram-no para as curvas obtidas em um tanque de sedimentação piloto de dimensões 3,7 m de comprimento por 0,6 m de largura, e profundidade regulável até 10 m. Pelo método usual, alguns valores obtidos na curva de escoamento, assim denominada pelos autores a curva resposta do recipiente, são tomados como representativos da eficiência hidráulica do equipamento analisado.

Entre estes valores cita-se o tempo de detenção médio, o tempo de detenção modal e o índice de dispersão Morril, que correspondem respectivamente às equações (II.11), (II.12) e (II.13).

O tempo de detenção mediano, que representa o tempo correspondente à recuperação de 50% da massa injetada, também foi citado pelos autores. O índice de dispersão Morril segundo REBHUN e ARGAMAN (11), é um indicativo do grau de mistura no reator. Os valores sugeridos, são utilizados como critério de se analisar o comportamento hidrodinâmico do tanque de sedimentação.

Pelo método proposto pelos autores, utiliza-se a função  $F(t)$ . Esta é obtida medindo-se a área sob a curva de escoamento num dado tempo.

Em sistemas reais, a função  $F(t)$  tem o seguinte

aspecto:

$$F(t) = 1 - \exp \left( -a (t - k) / T \right) \quad (\text{II.17})$$

onde  $a$  e  $k$  são constantes para um dado regime de escoamento, e  $T$  o tempo teórico de detenção dado pela razão entre o volume do reator e a vazão média.

Supondo que num tanque de sedimentação o escoamento compreenda regiões de mistura, espaços mortos e escoamento pistão, a função  $F(t)$  toma o seguinte aspecto:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - \left( \exp \left( -\frac{1}{m(1-p)} \right) \left( \frac{t}{T} - p_m \right) \right) & \text{para } \frac{t}{T} > p_m \\ 0 & \text{para } \frac{t}{T} \leq p_m \end{cases}$$

onde:

$p$  - fração de volume do tanque cujo escoamento é tubular

$1 - m$  - fração de volume do tanque que compreende espaços mortos

$m$  - fração de volume ativo do tanque

$1 - p$  - fração de volume do tanque correspondente à mistura perfeita

Se plotarmos em papel semi-logarítmico  $(1-F(t))$  versus  $t/T$  obteremos uma linha reta.

Para  $\log (1-F(t)) = 0$  temos

$$\frac{t}{T} = m_p \quad (\text{II.19})$$

e através da declividade da reta obtida e a equação (II.19) calculamos os valores de  $m$  e  $p$ .

Os valores de  $m$  variaram entre 98% e 100% e de  $p$  entre 24% e 38% para as várias condições de operação do equipamento. REBHUN e ARGAMAN (11) argumentam que o método por eles proposto é melhor representativo do escoamento pois considera toda a curva resposta, ao passo que no método usual tomam-se apenas alguns valores obtidos da curva-resposta.

## II.2.1 TRAÇADORES COMUMENTE EMPREGADOS EM ESTUDOS HIDRODINÂMICOS

RISTO KUOPPAMAKI (12) em seu excelente artigo descreve as aplicações de traçadores em estudos de tratamento de esgoto. Para medições de vazões com traçadores, citam-se os métodos da diluição (para injeção contínua), o método da contagem total e o método da amostragem total ( injeção instantânea com traçador radioativo ). Tais métodos são descritos por PLATA (9). Entre estes, o método que melhor se aplica à medição de vazões em estação de tratamento de esgoto é o Método da Diluição.

Em bacias de sedimentação os testes com traçadores têm sido usados afim de caracterizar a eficiência hidráulica do sedimentador. Entretanto o valor prático destes estudos tem sido relativo, uma vez que não há nenhuma correlação explícita entre o comportamento hidráulico expresso em termos de testes com traçadores e a remoção de sólidos. A instabilidade hidráulica existente principalmente em bacias de decantação tornam os dados obtidos pouco reprodutíveis.

Em tanques de aeração, devido ao fato de haver maior estabilidade no escoamento devido à mistura efetiva entre o líquido e o lodo, os resultados obtidos com testes com traçadores são reprodutíveis.

Teoricamente existem inúmeras possibilidades para se escolher um traçador para líquidos em escoamento. Na prática, a escolha depende muito frequentemente da familiaridade existente do pesquisador com o traçador escolhido, ou de

trabalhos anteriores realizados com o traçador, entre outros fatores. Fatores de ordem econômica e de segurança dos experimentadores são bastante considerados. Entre os traçadores radioativos mais usualmente utilizados encontram-se o  $\text{Na}^{24}$  (meia vida : 15 horas),  $\text{Br}^{82}$  (meia vida : 36 horas),  $\text{Co}^{60}$  (meia vida : 5,3 anos).

As partículas sólidas e o lodo ativado de estações de tratamento de esgotos, têm sido marcados com  $\text{Fe}^{59}$  (meia vida : 45 dias).

## II.3 MODELAGEM TEÓRICA

### II.3.1 GENERALIDADES

Para prever o comportamento de um equipamento, é preciso saber o que se passa no seu interior, isto é, há necessidade de se conhecer a natureza do escoamento. Para isto, precisamos saber por quanto tempo as partículas individuais permanecem no recipiente, ou mais precisamente, qual a distribuição dos tempos de residência (DTR) do fluido em escoamento. Esta informação é obtida pelo método de estímulo resposta.

A análise da resposta será possível por comparação com os modelos que descrevem o comportamento hidrodinâmico do equipamento.

Como já foi citado, existem dois modelos ideais de escoamento. São eles o modelo de escoamento pistão e o modelo de mistura perfeita.

Os equipamentos reais (reatores, decantadores, etc) não se ajustam bem a estes modelos ideais, pois neles podem ocorrer anomalias do escoamento, tais como: curto-circuito, zonas mortas ou a recirculação parcial de partículas de fluido no recipiente.

### II.3.2 NOÇÕES DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A análise de experiências através da técnica de estímulo-resposta torna-se mais precisa quando usamos a noção de função de transferência.

Consideremos o equipamento como uma caixa pre-



ta, sendo aplicada à sua entrada um estímulo  $X(t)$ . Considere-mos  $Y(t)$  a resposta do recipiente ao estímulo provocado em sua entrada. A função de transferência  $G(s)$  do tanque é definida como a razão entre a transformada de Laplace do sinal de saída  $Y(t)$  e a transformada de Laplace do sinal de entrada  $X(t)$ .

$$L( X(t) ) = X(s) \quad (\text{II.20})$$

$$L( Y(t) ) = Y(s) \quad (\text{II.21})$$

tem-se:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (\text{II.22})$$

Se  $X(t)$  for um sinal tipo Delta de Dirac (injeção instantânea) tem-se:

$$X(s) = L( X(t) ) = 1 \quad (\text{II.23})$$

$$Y(s) = G(s) \quad (\text{II.24})$$

Se  $X(t)$  for um sinal em degrau unitário ( injeção contínua ) tem-se:

$$X(s) = L( X(t) ) = \frac{1}{s} \quad (\text{II.25})$$

$$Y(s) = \frac{G(s)}{s} \quad (\text{II.26})$$

### II.3.3 MODELOS TEÓRICOS

Para um recipiente ideal com mistura perfeita , a função de transferência é dada pela equação seguinte:

$$G(s) = \frac{1}{1 + T.s} \quad (\text{II.27})$$

onde  $T$  = tempo teórico de detenção

$s$  = variável de Laplace

A resposta  $E(\theta)$ , deste equipamento a uma injeção instantânea e a uma injeção contínua são dadas respectivamente pelas equações (II.2) e (II.5).

Para um tanque ideal cujo escoamento é do tipo pistão, a função de transferência é dada por:

$$G(s) = e^{-Ts} \quad (\text{II.28})$$

A resposta deste equipamento para uma injeção instantânea e uma injeção contínua, são dadas respectivamente pelas equações (II.3) e (II.4).

Um modelo para escoamento não ideal frequentemente utilizado é aquele onde se consideram  $N$  reatores perfeitamente agitados em série com zonas mortas, figura (2.5).

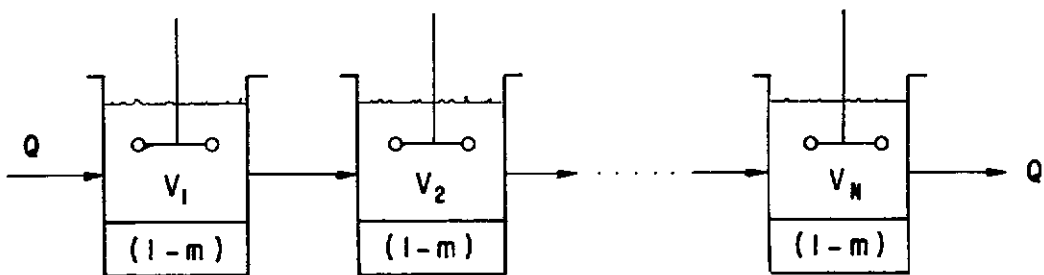


FIGURA 2-5 - Modelo de  $N$  Reatores Perfeitamente Agitados em Série com Zonas Mortas.

em que:

$$V_1 = V_2 = \dots = V_N = V/N \quad (\text{II.29})$$

As respostas para uma injeção instantânea e uma injeção contínua são dadas pelas equações abaixo:

- Injeção Instantânea

$$E(\theta) = \frac{1}{m^N} \cdot \frac{N^N}{(N-1)!} \cdot \theta^{N-1} \cdot \exp(-N\theta/m) \quad (\text{II.30})$$

- Injeção contínua

$$F(\theta) = 1 - \exp(-N\theta/m) \sum_{i=1}^N \frac{(N\theta/m)^{i-1}}{(i-1)!} \quad (\text{II.31})$$

onde:

$m$  - fração de volume total em mistura perfeita

$1-m$  - volume morto no recipiente

Este modelo foi utilizado para ajustar os dados experimentais obtidos nos tanques de aeração e no reciclo de lodo ativado.

Uma apresentação detalhada destes três modelos, citados anteriormente pode ser encontrada em ROUSTAN (1), LE VENSPIEL (2) e SANT'ANNA (7).

Para o ajuste dos dados experimentais obtidos no decantador secundário, foi utilizado o modelo denominado PCS TR utilizado por AZEREDO (13) para ajuste dos dados experimentais obtidos no decantador primário da ETIG. Este modelo é constituído de um encaminhamento em série de um escoamento em

mistura perfeita seguido de um escoamento pistão e seguido ainda por outro volume em mistura perfeita. (ver figura 2.6).

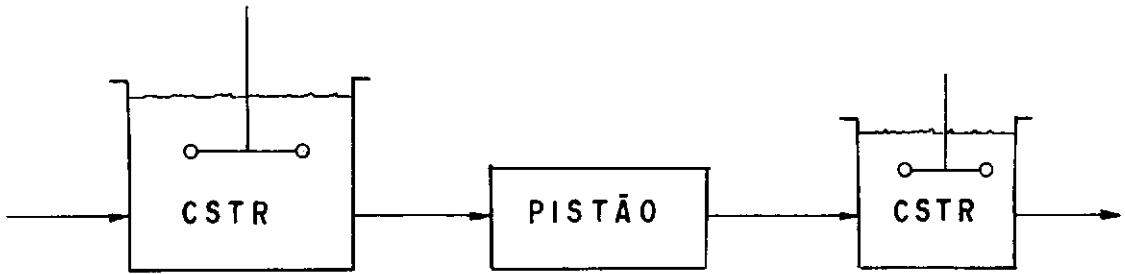


FIGURA 2-6 - Modelo Representativo do Escoamento no Interior do Decantador Secundário

As regiões no interior do decantador secundário cujo escoamento é representado por este modelo, são mostradas na figura (4.12).

A resposta a uma injeção instantânea para o modelo citado é dada por:

$$E(\theta) = \frac{1}{a - c} \cdot \left( \exp\left(-\frac{p - \theta}{a}\right) - \exp\left(-\frac{p - \theta}{c}\right) \right)$$

(II.32)

onde:

a - parâmetro correspondente ao volume existente no decantador secundário representado pelo primeiro CSTR

p - fração do volume do decantador secundário com escoamento pistão

c - parâmetro correspondente à fração de volume no decantador secundário representado pelo segundo CSTR

Da revisão de todos estes trabalhos, constata-se que os tanques de aeração apresentam elevado grau de mistura, caracterizados por elevados valores do coeficiente de dispersão (caso do modelo de dispersão axial) ou por tanques perfeitamente agitados em série. Quanto aos sedimentadores e tanques de cloração constata-se a verificação de modelos compostos onde uma expressiva parcela do fluido escoar em regime de mistura perfeita.

## C\_A\_P\_Í\_T\_U\_L\_O III

## MATERIAIS E MÉTODOS

## III.1 Escolha do Traçador

Quando se deseja marcar líquidos em escoamento, o traçador utilizado deve apresentar certas propriedades que tornem os resultados experimentais obtidos representativos do escoamento em questão. As propriedades que norteiam a escolha dos traçadores empregados neste trabalho estão enunciadas a seguir:

- Comportamento Idêntico ao do Líquido em Escoamento:

Esta é a propriedade mais importante a ser considerada, quando se deve optar por um entre diversos traçadores. O traçador ideal, tem a propriedade, entre outras, de simular perfeitamente o escoamento, sem interferir nele nem modificar suas características físicas, químicas e hidrodinâmicas, caso contrário, todas as análises inferidas estariam afetadas e a confiabilidade nos resultados estaria comprometida.

- Seletividade do Traçador:

Refere-se à facilidade de distinção do traçador no meio em que se encontra, em relação a outras substâncias eventualmente similares existentes no sistema.

- Sensibilidade de Detecção do Traçador:

Refere-se à maior ou menor facilidade de se detectar pequenas quantidades do traçador presentes no escoamento.

- Baixo "Background":

Diz respeito à quantidade do traçador selecionado, naturalmente existente no meio antes de qualquer estímulo artificial, provocado pelo experimentador.

- Estabilidade:

Não deve haver perdas de traçador seja por reação química, por aderência às paredes ou fundo do equipamento estudado, ou ainda e principalmente por adsorção em sólidos em suspensão existentes no líquido traçado, devido à necessidade frequente de estabelecer-se um balanço de massa entre a entrada e a saída do equipamento. Em outras palavras o traçador deve ser conservativo, para que haja correspondência entre a massa injetada e a recuperada. Perdas por adsorção introduzem erros difíceis de serem corrigidos.

- Facilidade de Transporte, Manuseio e Baixo Custo:

Propriedade importante quando se trata de traçador radioativo. Quanto maior a atividade inicial do material, tanto mais espessa a blindagem de chumbo que o envolve, evitando-se riscos de exposição a radiações a quem compete o transporte, e posteriormente, ao pessoal que trabalha próximo ao local da estocagem do material irradiado.

Deve-se optar por materiais menos perigosos, isto é, materiais que emitem radiações de média energia, de meia vida compatível com a duração da experiência e de bai

xa toxidez radioativa.

Considerando-se o elevado volume de líquido a ser marcado na ETIG (cerca de  $5300 \text{ m}^3$ ), foi estabelecido o seguinte critério de escolha: o traçador deveria ter o comportamento hidráulico idêntico ao do escoamento, baixo "background", ser de fácil detecção no local da experiência. Com isto eliminou-se todos os traçadores sólidos e os salinos. Com relação ao traçador salino Cloreto de Sódio, foi feita uma estimativa da massa a ser injetada na ETIG, caso se mantivesse a relação 400 entre a concentração de pico e a de "background" na curva-resposta. Seriam necessários 13 t de NaCl, o que tornaria as experiências prática e economicamente inviáveis. Pelo critério estabelecido, a opção deveria ser feita entre traçadores fluorescentes e/ou radioativos. A decisão foi tomada, e escolheu-se o traçador fluorescente Amidorodamina G Extra, devido ao fato de que já havia sido testado com sucesso no laboratório de traçadores (LT/COPPE) e também devido às crescentes citações de seu uso, com sucesso, em situações outras. Este traçador foi empregado na totalidade das experiências de campo. Selecionou-se também o traçador radioativo Bromo-82 com a finalidade de se comparar as curvas experimentais obtidas. Este foi considerado, neste estudo, como padrão, pois não há adsorção deste em sólidos em suspensão presentes nos equipamentos analisados. A meia vida do Bromo-82 é de 36 horas, e foi injetado 31 mCi em cada um dos tanques de aeração. Devido ao alto custo de irradiação e transporte deste traçador, seu emprego foi limitado a apenas uma experiência de campo.



### III.2 Unidades de Tratamento Estudadas

#### III.2.1 Dimensões dos Equipamentos

De posse de medidas obtidas nas plantas construtivas da ETIG, datadas de setembro de 1963 e fevereiro de 1964, calculou-se o volume de cada um dos tanques de aeração e do sistema de decantação, este, constituído pelo decantador secundário e linhas de reciclo de lodo. Estes valores estão registrados na tabela 3.1. Planta e corte esquemático da ETIG, construídos a partir das referidas plantas são mostradas nas figuras (3.1) e (3.2).

ITEM	COMPONENTES DO SISTEMA ESTUDADO	VOLUME (m <sup>3</sup> )
1	volume interno do decantador secundário	1672,0
2	volume de líquido na calha lateral	29,0
3	volume da linha de alimentação de esgoto	5,3
4	volume do tanque de alimentação de esgoto	6,8
5	volume do duto de descarga de lodo	1,0
6	volume de lodo no tanque de lodos	1,5
7	volume dos dutos de lodo até os tanques de aeração	11,4
	volume total do sistema de decantação	1727,0
8	volume de cada tanque de aeração	1806,0
	volume total dos tanques de aeração	3612,0
	volume total do sistema estudado	5339,0

TABELA 3.1 Volumes Componentes das Unidades de  
Tratamento Estudadas (ETIG)

Os volumes constantes dos itens 1 a 7 da Tabela 3.1 constituem o que denominamos Sistema de Decantação.

O volume total dos três equipamentos analisados neste estudo é de  $5339 \text{ m}^3$ .

### III.2.2 Decantador Secundário - Perfil de Concentração de Sólidos

Considerando-se uma injeção instantânea no decantador secundário, parte do traçador se dispersava no sobrenadante e outra parte no lodo ativado. Denominamos aqui "sobrenadante", a porção do volume líquido do decantador secundário cujas concentrações de sólidos em suspensão são consideradas baixas, segundo o perfil esquemático de concentrações de sólidos em suspensão mostrado na figura (3.3). Denominamos aqui "lodo ativado" ou simplesmente "lodo" a porção de líquido no decantador secundário cujo volume possui concentrações expressivas de sólidos em suspensão. Vale observar ainda que o lodo é constituído em sua maior parte por líquido. Admitindo-se que o traçador injetado seja distribuído homogeneamente à entrada do decantador secundário, consideraremos, neste trabalho, que o traçador disperso no lodo o marcará, como se este fosse constituído apenas de líquido. Ou, em outras palavras, fez-se a simulação das partículas sólidas pela marcação do líquido, como primeira aproximação. O ideal seria marcá-las com outro traçador mais apropriado.

Para se ter uma idéia do volume de lodo no interior do decantador secundário, foram realizadas duas medi-

ções de campo as quais foram utilizadas para determinar os perfis de concentração de sólidos dentro deste equipamento. Para tanto, utilizou-se uma pequena bomba cuja vazão é de aproximadamente 3,6 l/h, alimentada por uma bateria de 12 V, com a finalidade de se coletar amostras de líquido em profundidade. À bomba foi acoplado um tubo de 3,5 m de comprimento e 5 mm de diâmetro com graduações de 0,20 em 0,20 m. Uma amostra foi retirada à 0,50 m e outra à 1,0 m de profundidade contado a partir da superfície. A partir deste ponto, amostras foram coletadas de 0,20 em 0,20 m até o fundo do decantador (aproximadamente 3,2m). As amostras coletadas em frascos plásticos, foram levadas ao laboratório, sendo submetidas à filtração simples em papéis - filtro para posterior secagem e pesagem. Com estes resultados pôde-se traçar os perfis de concentração de lodo, tal como representado esquematicamente na figura (3.3). Os resultados experimentais são mostrados na figura (4.11) do capítulo seguinte.

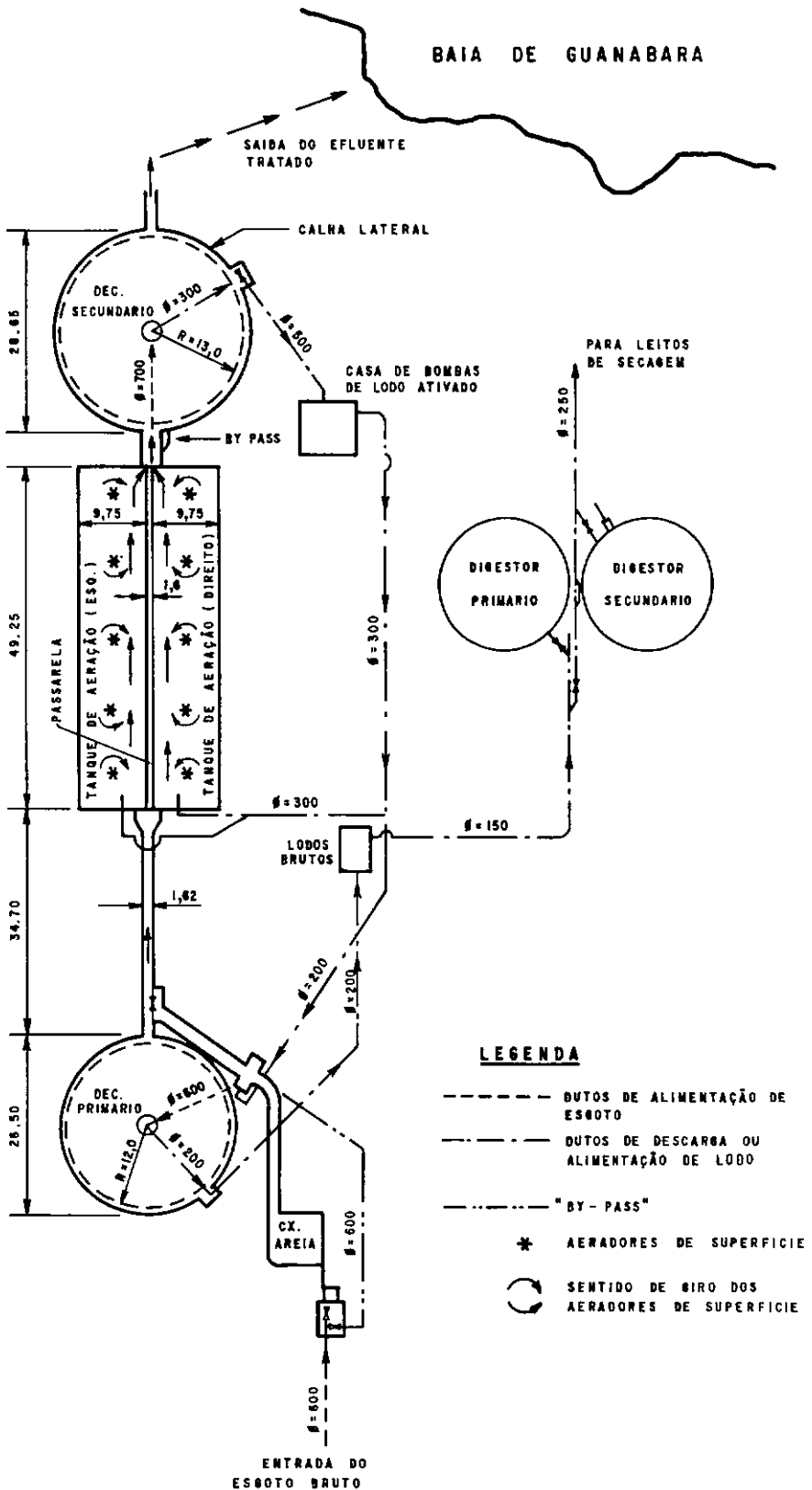


FIGURA 3-1 - Planta Esquemática ETIG

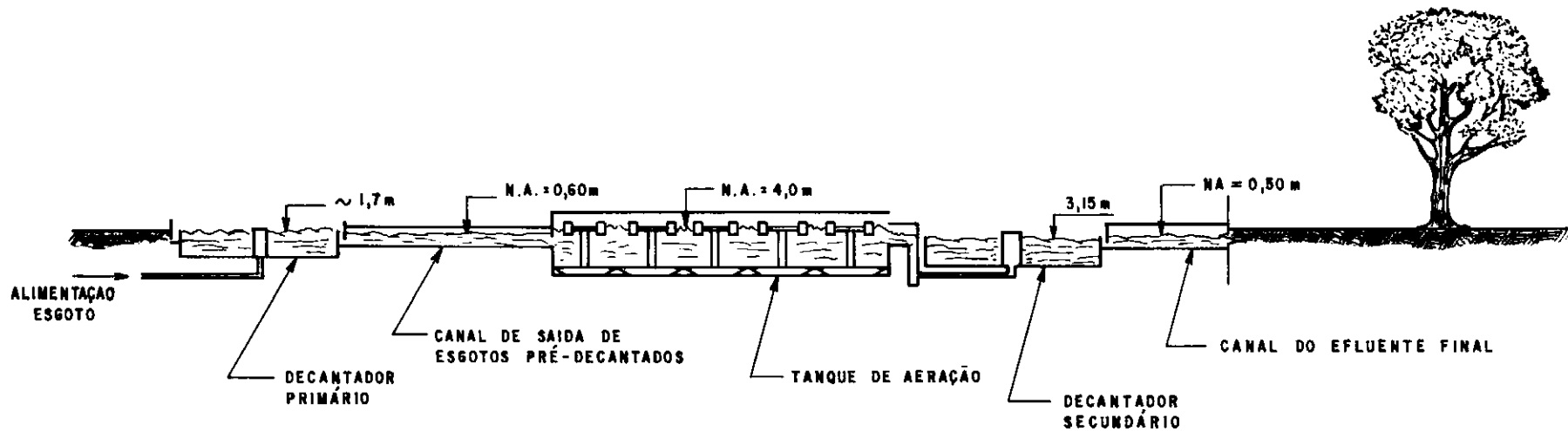


FIGURA 3-2 - Corte Esquemático ETIG

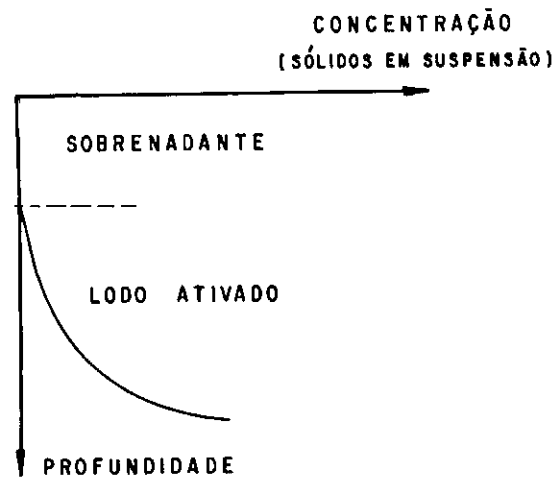
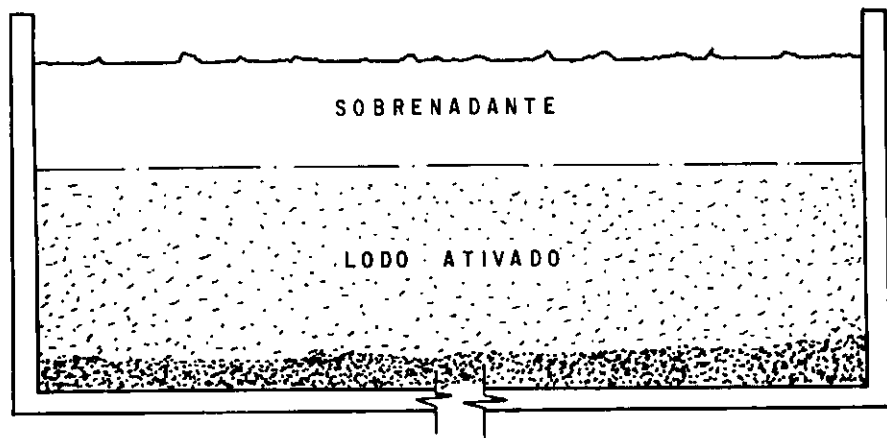
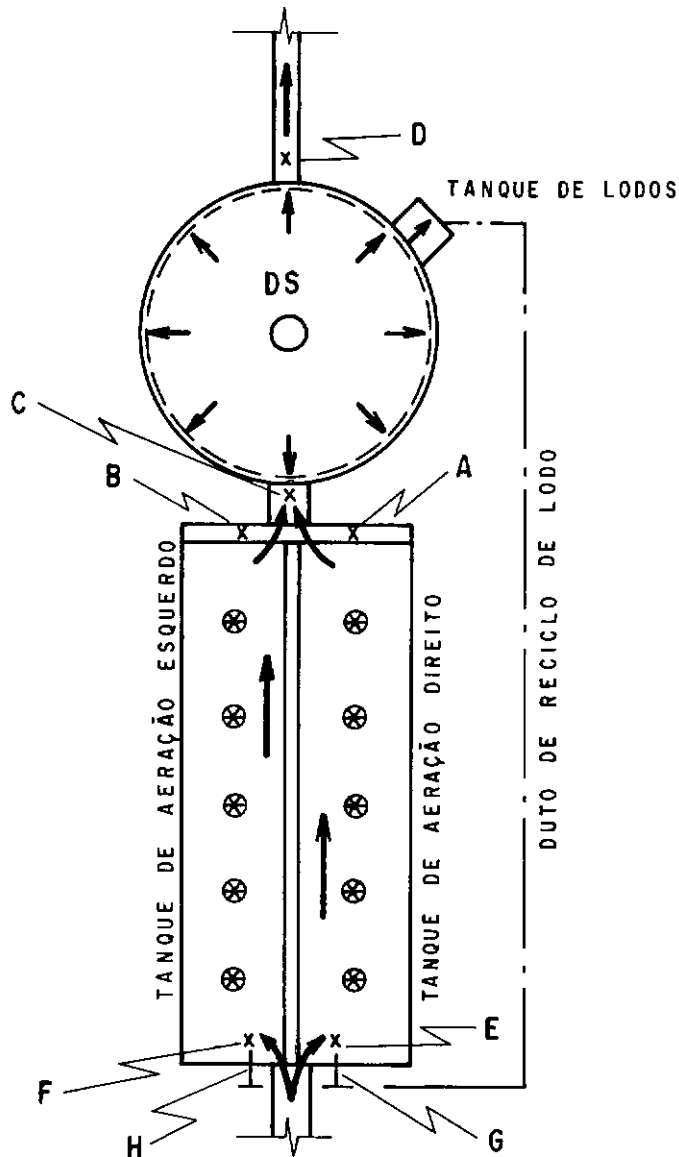


FIGURA 3.3 - Esquema ilustrando as Regiões de Sobrenadante e Lodo no interior do Decantador Secundário.



Legenda:

- A - Saída do Tanque de Aeração Direito
- B - Saída do Tanque de Aeração Esquerdo
- C - Entrada do Decantador Secundário (ponto de injeção)
- D - Saída do Decantador Secundário
- E - Ponto de Injeção de traçador no Tanque de Aeração Direito
- F - Ponto de Injeção de traçador no Tanque de Aeração Esquerdo
- G - Duto de Retorno de Lodo do Tanque de Aeração Direito
- H - Duto de Retorno de Lodo do Tanque de Aeração Esquerdo

\* Aeradores de Superfície

→ Sentido do fluxo

FIGURA 3-4 - Esquema dos Pontos de Injeção e Coleta de Amostras

### III.3 Atividades Experimentais Realizadas em Campo

#### III.3.1 Preparo, Injeção e Manipulação do Traçador Fluorescente

Foram realizadas cinco experiências de campo com injeção instantânea nos tanques de aeração. Nas três primeiras, a injeção foi realizada apenas no tanque de aeração direito. Nas duas últimas o traçador foi introduzido simultaneamente em ambos os tanques de aeração. Na última experiência, além do traçador fluorescente Amidorodamina G Extra injetou-se simultaneamente o traçador radioativo Bromo-82 diluído em 1000 ml de água.

Utilizou-se em todas as experiências 50 g de Amidorodamina G Extra. Tal valor foi baseado em experiências anteriores realizadas por AZEREDO (13) no decantador primário da ETIG, nas quais injetou-se 20 g de traçador para marcar um volume de cerca de 1100 m<sup>3</sup>. Injetando-se 50 g de traçador, a concentração de pico da curva experimental, seria cerca de 400 vezes maior que a concentração de "background". Assim, eventuais flutuações de concentração de "background" não interfeririam nas curvas experimentais obtidas.

Após a diluição do traçador em frasco de polietileno de 1000 ml com agitação intensa, fez-se a injeção da mistura nos tanques de aeração. Imediatamente após, iniciou-se a coleta de amostras à saída dos tanques de aeração direito e esquerdo com frequências pré estabelecidas de modo a obter-se a curva resposta com cerca de 50 amostras. As amostras coletadas foram levadas ao laboratório e ali analisadas posteriormente.



Foram realizadas três experiências de campo com injeção instantânea no decantador secundário, coletando-se amostras à saída deste, à saída do duto de retorno de lodo e à saída dos tanques de aeração. A figura (3.4) mostra os pontos de injeção e coleta de amostras nos equipamentos estudados. A realização de experiências com injeção no decantador secundário transcorreu de maneira idêntica àquella descrita para os tanques de aeração. As amostras coletadas foram transferidas imediatamente para frascos plásticos de 60 ml, tampadas e colocadas em sacos plásticos pretos, evitando-se assim a sua exposição direta aos raios solares. Cada frasco de 60 ml foi rotulado previamente em laboratório. Durante as experiências, as amostras eram identificadas com indicações, no rótulo, relativas à data da experiência, hora de coleta da amostra e locais de coleta, evitando-se quaisquer confusões.

### III.3.2 Preparo, Injeção Conjunta e Manipulação dos Traçadores Fluorescente e Radioativo

Utilizando-se um frasco com volume aproximado de 1100 ml, fez-se em primeiro lugar a diluição do traçador fluorescente Amidorodamina G Extra em 1000 ml de água com agitação intensa durante 5 minutos. Posteriormente colocou-se o frasco plástico dentro de um cilindro de ferro de altura igual a 6,0 cm, e diâmetro ligeiramente maior que o do frasco. Tal cilindro tem por objetivo dar estabilidade ao frasco de diluição e permitir uma mistura mecânica complementar realizada por um agitador especialmente projetado para tal fim. Colocou-se então no interior do frasco, com auxílio de

uma pinça, manipulada por um braço metálico de 2,0 m de comprimento, uma das cinco pastilhas irradiadas no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN-Nuclebrás), situado em Belo Horizonte - MG. A agitação mecânica foi realizada por uma pequena hélice giratória, cujo movimento era produzido por um pequeno motor instalado em uma tampa de latão construída especialmente para vedar o frasco que continha ambos os traçadores. O movimento giratório da hélice provoca a homogeneização rápida da mistura radioativa. Evita-se assim a exposição prolongada do experimentador à radiação emitida pela mistura. A agitação foi necessária por um período de 10 minutos aproximadamente para total diluição da pastilha radioativa. Este mesmo processo foi repetido com o outro frasco de injeção contendo água, Amidorodamina G Extra e outra pastilha de Bromo-82 irradiada quando da injeção no outro tanque de aeração. Neste experimento foram realizadas injeções instantâneas, simultaneamente em ambos os tanques de aeração.

Os pontos de coleta de amostras para análise de traçador fluorescente foram os mesmos citados no item anterior quando se fez injeção nos tanques de aeração.

Para detecção do traçador radioativo, utilizou-se seis sondas de cintilação acopladas a seis cintilômetros SPP-3 (SAPHYMO - SRAT). A sonda de cintilação é constituída basicamente de duas partes: um cristal de cintilação e uma válvula fotomultiplicadora. O cristal de cintilação é formado de Iodeto de Sódio com traços de Tálcio e tem a propriedade de emitir fótons luminosos quando excitados por radiação nuclear. Através da válvula fotomultiplicadora

os fótons luminosos são transformados em pequenos pulsos elétricos que podem ser medidos. A amplitude destes pulsos elétricos são proporcionais à energia de radiação incidente e sua frequência idêntica a das radiações detectadas. Os cintilômetros são aparelhos capazes de determinar a frequência dos pulsos elétricos gerados pela sonda de cintilação, fornecendo leituras que representam a média de pulsos elétricos, por segundo, que chegam à sonda. As leituras dos cintilômetros foram anotadas em formulários apropriados, e realizadas em intervalos de tempo iguais aos de coleta de amostra para análise do traçador fluorescente.

A data das experiências realizadas em campo, locais de injeção de traçador, pontos de coleta de amostras e traçador injetado em todas as experiências são mostradas na tabela 3.2.

DATA DA EXPERIÊNCIA	LOCAL DE INJEÇÃO	PONTO DE COLETA DE AMOSTRAS (*)	TRAÇADOR INJETADO
29/08/83	C	C-D-G	Amidorodamina G Extra
31/08/83	E	A-D-G	Amidorodamina G Extra
31/10/83	C	C-D	Amidorodamina G Extra
13/12/83	E	A-G	Amidorodamina G Extra
10/01/84	C	C-D	Amidorodamina G Extra
25/01/84	E	A-G	Amidorodamina G Extra
21/02/84	E e F	A-B-C-D G-H	Amidorodamina G Extra
27/03/84	E e F	A-B-C-D G-H	Amidorodamina G Extra Bromo-82

\* ver figura (3.4)

TABELA 3.2 - Resumo Geral das Experiências de Campo

### III.3.3 Medidas de Vazão

#### III.3.3.1 Vazão de Reciclo de Lodo Ativado

Para se medir a vazão de recirculação de lodo ativado, foi utilizado o "Método da Diluição" com injeção contínua do traçador fluorescente Amidorodamina G Extra. Neste método, injeta-se em uma seção  $S_1$ , da corrente de entrada durante um determinado período de tempo, uma solução de traçador de concentração  $C_0$  com uma vazão constante " $q$ ". Em outra seção  $S_2$  situada à jusante, e localizada de maneira a se garantir uma boa mistura, a concentração de traçador tomará um valor constante  $C_1$ . Denominando-se " $Q$ " a vazão a ser medida e se  $C_0 \gg C_1$  e  $C_1 \gg C_{Bkg}$  (Concentração natural de traçador no sistema) é válida a seguinte relação:

$$Q/q = C_0/C_1 \qquad Q = q \cdot C_0/C_1 \qquad (III.1)$$

Foram diluídas em 200 ml de água destilada 8g de Amidorodamina G Extra e injetada no escoamento com vazão constante de 5,6 ml/min fornecida por uma pequena bomba peristáltica, durante um período de aproximadamente 30 min. O ponto de injeção foi o tanque de lodos identificado na figura (3.4), e os pontos de coleta de amostra correspondentes às letras G e H da citada figura. O ponto escolhido para realizar a injeção contínua do traçador garantiu uma boa mistura deste, pois além do comprimento de tubulação (cerca de 120 vezes o diâmetro do tubo) garantir uma boa mistura, o traçador passaria forçosamente pelas bombas de recalque de lodo aumentando sua homogeneização com o líquido. Após a análise espectrofluorimétrica das amo-

tras coletadas plotou-se as curvas concentração versus tempo correspondente ao lodo de retorno a ambos os tanques de aeração. Destas curvas obteve-se as concentrações de patamar de cada uma delas, cujos valores foram 46,0 ppb e 46,4 ppb respectivamente para o lodo afluente aos tanques de aeração direito e esquerdo. Utilizando a equação (III.1) foi calculada a vazão de recirculação de lodo aproximadamente igual a 81 l/s. Dois destes experimentos foram realizados em dias diferentes, confirmando o valor medido. Informações iniciais obtidas na ETIG davam conta que a vazão de reciclo situava-se entre 70 e 80 l/s, posteriormente, funcionários da Companhia Estadual de Águas e Esgoto (CEDAE-RJ) confirmaram estes valores.

A figura (3.5) mostra o aspecto das curvas-resposta obtidas nesta medição.

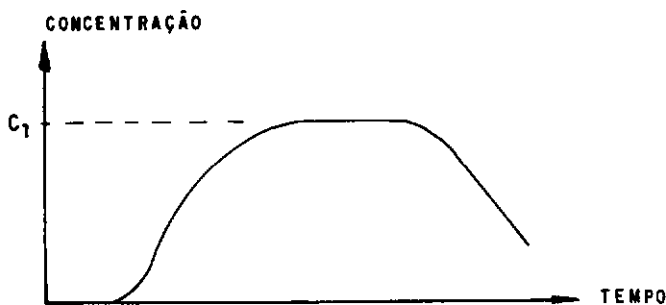


FIGURA 3.5 - Aspecto da Curva - Resposta a Injeção no Tanque de Lodos

### III.3.3.2 Vazão de Esgotos Afluentes

O conhecimento das vazões de tratamento é de extrema importância, pois esta é a principal variável que dispomos para tomarmos conhecimento das condições de operação da estação de tratamento durante as experiências realizadas.

A constância das vazões com o tempo é possível de ser obtida quando os experimentos são realizados a níveis laboratoriais e em equipamentos pilotos para análise hidrodinâmica. No caso em estudo, em que as experiências foram realizadas à nível industrial, o controle da vazão para obter-se um regime permanente é impraticável.

Durante todas as experiências realizadas, foram feitas leituras de vazão no medidor Parshal existente na ETIG. Nas três primeiras horas, a frequência de leituras foi de 10 em 10 minutos, e de 15 em 15 minutos após as três horas iniciais até o fim da experiência. Para efeito de comparação com as vazões obtidas no medidor Parshal, simultaneamente foram medidas vazões no canal efluente do decanta

dor primário, que conduz esgotos pré-decantados aos tanques de aeração. Foi utilizado para tanto, o "método da área x velocidade, sendo a velocidade do escoamento medida através de um flutuador. As vazões foram obtidas cronometrando-se o tempo gasto pelo flutuador para deslocar-se entre duas seções do canal efluente distantes 10 m entre si e medindo-se a profundidade da lâmina d'água também no interior do canal. A largura deste é conhecida e igual a 1,62 m. Tais vazões eram medidas em intervalos de tempo de 15 em 15 minutos nas três primeiras horas do experimento, e de 30 em 30 minutos após as três horas iniciais. Os valores das vazões obtidas através do flutuador e as leituras na calha Parshal eram anotadas em formulários próprios.

#### III.4 Metodologia Seguida em Laboratório

As amostras coletadas em campo foram ordenadas no laboratório segundo a procedência e os horários de coleta. A análise de concentração de traçador nestas amostras, iniciava-se no dia seguinte ao da experiência. Foi utilizado para tais análises o espectrofluorímetro JOBIN YVON3 - (JY3). Este aparelho é constituído basicamente de quatro partes principais.

- 1 - fonte luminosa
- 2 - conjunto de monocromadores
- 3 - câmara de amostras
- 4 - compartimento do sistema eletrônico

##### 1 - Fonte Luminosa:

É uma lâmpada de Xenônio de 150 W com bulbo

de quartzo.

## 2 - Conjunto de Monocromadores (Monocromador Primário e Monocromador Secundário)

O primeiro seleciona uma estreita faixa (largura 10 nm) de comprimentos de onda da luz incidente sobre a amostra.

O segundo seleciona uma estreita faixa de comprimentos de onda emitidos pelo traçador fluorescente contido na amostra e que chegará a válvula fotomultiplicadora.

## 3 - Câmara de Amostra

Peça removível onde se instala a cubeta de quartzo prismática cujas dimensões são 10 x 10 x 45 mm (volume útil = 4,5 ml) no interior da qual se coloca parte da amostra coletada.

## 4 - Compartimento do Sistema Eletrônico

Local onde se encontram os circuitos eletrônicos do JY3 com todos os seus ajustes necessários para proceder às análises espectrofluorimétricas.

O painel frontal é composto de um mostrador com 100 graduações, seletor de escala, chave de ajuste de "fluorescência zero", chave de ajuste de balanço eletrônico. Tais controles estão descritos detalhadamente no MANUAL DE INSTRUÇÕES E OPERAÇÃO (14) do espectrofluorímetro JY3.

### III.4.1 Preparo e Manuseio das Amostras

Amostras coletadas à saída de ambos os tanques de aeração, à entrada e saída do decantador secundário,



foram analisadas após decantação de sólidos em suspensão, por um período mínimo de quatorze horas. Com relação às amostras coletadas nos dutos esquerdo e direito de retorno de lodo, além do período de sedimentação, eram ainda centrifugadas caso, através de uma avaliação visual, apresentassem ainda grande turbidez. O tempo de centrifugação foi fixado em quatro minutos no mínimo, com a centrífuga girando a aproximadamente 3000 rotações por minutos (rpm). Os recipientes onde se colocam as amostras no interior da centrífuga, foram especialmente construídos no LT/COPPE de forma a não se precisar retirá-las dos frascos plásticos, diminuindo com isto o manuseio e consequente agitação da amostra.

Os sólidos em suspensão quando presentes em grandes quantidades nas amostras analisadas, perturbam a medida da fluorescência. Qualitativamente, pode-se dizer que para baixas concentrações de traçador na amostra, os sólidos em suspensão podem introduzir grandes perturbações no sentido de aumentar e introduzir flutuações nas leituras de fluorescência. Para altas concentrações de traçador, a influência é quantitativamente menor, e os sólidos em suspensão tendem a diminuir as leituras de fluorescência. Em ambos os casos, conclusões errôneas quanto à concentração de traçador existente na amostra, seriam obtidas. Por estes motivos tornou-se imperiosa a adoção das medidas visando a remoção dos sólidos em suspensão das amostras analisadas.

Após o período de sedimentação dos sólidos e/ou centrifugação das amostras, os frascos plásticos que as continham eram manipulados com todo o cuidado, de forma a minimizar a agitação destes evitando-se assim a ressuspensão

de sólidos. Com auxílio de uma pipeta e uma pera de borracha, retirava-se do interior do frasco, cerca de 15 ml de líquido. Tal volume é suficiente para se fazer no mínimo três análises espectrofluorimétricas da mesma amostra. Parte deste volume (3 ou 4 ml) era transferido à cubeta de forma a cobrir mais da metade do volume útil desta. Os valores resultantes de cada análise eram anotados em formulários próprios. O valor adotado como leitura final de uma amostra qualquer, foi a média aritmética dos três valores lidos para tal amostra, caso a divergência entre eles fosse menor que três unidades. Caso contrário procedia-se nova análise da amostra, abandonando-se os valores que divergissem entre si das três citadas unidades.

As leituras mostradas pela deflexão do ponteiro do JY3 são convencionalmente denominadas no Laboratório de Traçadores de "Leituras Fluorimétricas", e as unidades de leituras fluorimétricas denominadas "Unidades Fluorimétricas". Teórica e praticamente, as leituras fluorimétricas são diretamente proporcionais às concentrações de traçador existentes nas amostras. Para se conhecer a relação de proporcionalidade, preparou-se retas de calibração correspondentes à cada ponto de coleta de amostra em cada dia de experiência de campo. Antes de ser realizada a injeção de traçador, retirava-se cerca de 15 litros de esgoto nos pontos onde posteriormente se coletariam amostras para análise das curvas-resposta. Desta forma, tem-se um volume de esgoto cuja concentração do traçador Amidorodamina G Extra corresponde à de "background". Este volume foi utilizado, posteriormente em laboratório, para a preparação de concentrações conhecidas do traçador fluorescente injetado. Tais concentrações foram

de 0,5 - 1,0 - 2,0 - 4,0 - 5,0 - 7,0 - 10,0 e 15,0 ppb. Assim as concentrações analisadas nas retas de calibração cobririam uma faixa de concentrações medidas nas amostras coletadas para análise da curva-resposta do equipamento. Foram feitas no mínimo cinco análises espectrofluorimétricas em dias consecutivos, das concentrações das retas de calibração; e o procedimento de tais análises é idêntico aquele para amostras coletadas em campo após injeção de traçador, salvo que não houve necessidade de centrifugação das amostras analisadas.

Conhecidas as leituras fluorimétricas de cada uma das concentrações preparadas para análise da reta de calibração, obtem-se a equação da reta correspondente. Convencionalmente converte-se todas as leituras fluorimétricas obtidas, à escala 100, com objetivo de obter-se uma reta de calibração única. Utilizando-se uma regra de três simples e direta, chega-se à seguinte equação de conversão de leituras fluorimétricas para a escala 100:

$$L = \frac{\bar{L}_x \cdot 100}{X} \quad (\text{III.2})$$

onde:

$L$  = valor das leituras fluorimétricas relativo à escala 100 do espectrofluorímetro

$\bar{L}_x$  = média aritmética dos três valores lidos para cada amostra analisada

$X$  = escala de leitura do espectrofluorímetro. Pode assumir os valores 1 - 3 - 10 - 30 - 100 - 300 - 1000

Plotou-se em papel milimetrado os valores de concentração versus L, obtendo-se as equações das retas desejadas. Com estas, calculou-se as concentrações de traçador existentes nas amostras coletadas em campo após injeção, obtendo-se finalmente as curvas-resposta , Concentração x Tempo, de cada equipamento. Este processo de cálculo foi realizado com auxílio do programa de computador, e as retas de calibração calculadas pelo método dos mínimos quadrados.

## C\_A\_P\_Í\_T\_U\_L\_O IV

## RESULTADOS OBTIDOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

## IV.1 A Proposição Inicial e o Encaminhamento Seguido

A idéia inicial para o desenvolvimento deste trabalho era injetar-se traçador instantânea e simultaneamente à entrada dos tanques de aeração - pontos (E) e (F) da figura 3.4 - obtendo-se a curva-resposta do sistema Tanques de Aeração - Decantador Secundário à saída deste. De posse desta curva, tentaríamos obter um modelo teórico que melhor se ajustasse a curva experimental do sistema. Para isto, seria necessário encontrar-se a função de transferência deste sistema, obter-se posteriormente a transformada inversa de Laplace desta função, obtendo-se assim a distribuição dos tempos de residência do sistema global. Para o conhecimento desta distribuição, é imprescindível conhecer-se as funções de transferência das partes constituintes do sistema estudado. O sistema de sedimentação foi dividido em dois subsistemas: o sobrenadante e o lodo. O sobrenadante é caracterizado pelo volume de líquido isento de sólidos em suspensão existente no decantador, e pelo volume de líquido no canal de coleta periférico. O lodo é caracterizado por apresentar concentrações elevadas de sólidos em suspensão sendo constituído do volume de lodo espesso na câmara de decantação e na linha de reciclo. O cálculo do volume das fases sobrenadante e lodo foi feito baseado nos dados da Tabela 3.1 e nos perfis de concentração que se

rão apresentados adiante. A figura 4.1 esquematiza as partes em que se dividiu hipoteticamente o sistema global estudado.

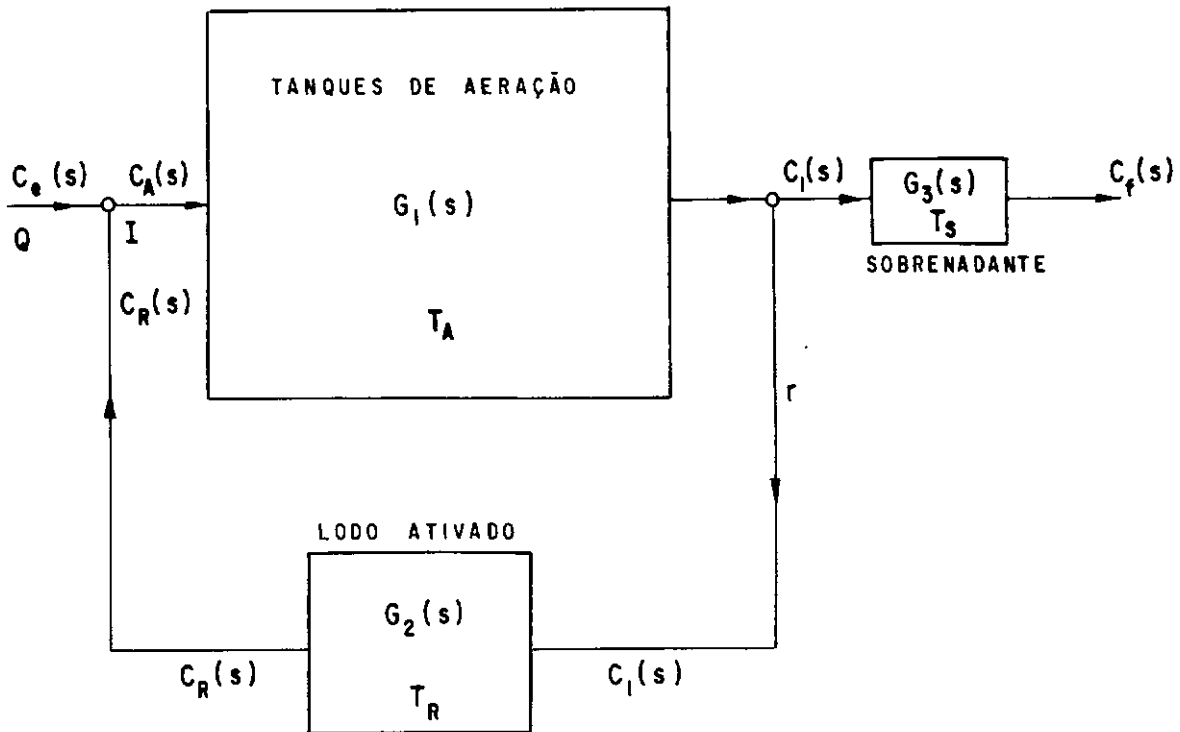


FIGURA 4-1 - Esquema das Partes do Sistema Tanques de Aeração - Decantador Secundário

Os símbolos que aparecem na Figura (4.1) têm o seguinte significado:

$G_1(s)$  - Função de transferência dos tanques de aeração

$T_A$  - Tempo médio de residência dos tanques de aeração

$G_2(s)$  - Função de transferência da fase lodo ativado

$T_R$  - Tempo médio de residência da fase lodo

$G_3(s)$  - Função de transferência da fase sobrenadante do decantador secundário

$T_S$  - Tempo médio de residência da fase sobrenadante do decantador secundário

$C_e(s)$  - Transformada de Laplace do sinal de entrada

$C_A(s)$  - Transformada de Laplace do sinal de entrada modificado pelo reciclo de lodo ativado

$C_1(s)$  - Transformada de Laplace da resposta dos tanques de aeração

$C_f(s)$  - Transformada de Laplace da resposta da fase sobrenadante do decantador secundário provocada pelo sinal de entrada  $C_1(s)$  nesta fase

$C_R(s)$  - Transformada de Laplace da resposta da fase lodo provocada pelo sinal de entrada  $C_1(s)$  nesta fase

$Q$  - vazão afluente média

$r$  - taxa de reciclo

Por definição de função de transferência, tem-se que:

$$G_1(s) = C_1(s) / C_A(s) \quad (\text{IV.1})$$

$$G_2(s) = C_R(s) / C_1(s) \quad (\text{IV.2})$$

$$G_3(s) = C_f(s) / C_1(s) \quad (\text{IV.3})$$

$$G(s) = C_f(s) / C_e(s) \quad (\text{IV.4})$$

onde  $G(s)$  é a função de transferência do sistema global, cuja transformada de Laplace inversa fornecerá a distribuição dos tempos de residência.

Ao se estabelecer o balanço de massa no nó (I) virá:

$$Q.C_e(s) + r.Q.C_R(s) = (1 + r).Q.C_A(s)$$

$$C_e(s) = (1 + r).C_A(s) - r.C_R(s) \quad (\text{IV.5})$$

Substituindo as equações (IV.5) e (IV.3) em (IV.4) vem:

$$G(s) = \frac{C_1(s).G_3(s)}{(1 + r).C_A(s) - r.C_R(s)} \quad (\text{IV.6})$$

Explicitando os valores de  $C_A(s)$  e  $C_R(s)$  respectivamente nas equações (IV.1) e (IV.2), e substituindo tais valores na equação (IV.6) tem-se:



$$G(s) = \frac{C_1(s) \cdot G_3(s)}{(1+r) \cdot \frac{C_1(s) - r \cdot C_1(s) \cdot G_2(s)}{G_1(s)}}$$

Simplificando, obtem-se a equação final da função de transferência do sistema global, dada pela equação abaixo:

$$G(s) = \frac{G_3(s)}{(1+r) / G_1(s) - r \cdot G_2(s)} \quad (\text{IV.7})$$

A obtenção das funções de transferência das partes do sistema seria possível injetando-se traçador em cada equipamento e analisando-se a resposta individual destes.

Neste ponto surge o problema da re-injeção de traçador de forma variável provocada pelo reciclo de lodo ativado. Isto significa que as respostas dos equipamentos estarão influenciadas, a partir de um certo tempo, por parte da massa de traçador que voltaria ao equipamento. Com isto, apenas parte da curva-resposta representaria a distribuição dos tempos de residência do equipamento. Sendo assim, o modelo teórico deveria se ajustar apenas à parte da curva experimental do tanque, não influenciada pelo reciclo de lodo. Conhecendo-se o modelo teórico que melhor se ajusta às curvas experimentais de cada equipamento ter-se-á conseqüentemente as funções de transferência de cada tanque modelado, uma vez que a transformada inversa de Laplace de  $G(s)$  é a própria distri

buição de tempos de residência.

Para chegar-se à distribuição de tempos de residência do sistema Tanques de Aeração - Decantador Secundário seria necessário encontrar a transformada inversa de Laplace da equação (IV.7), o que, por vezes, envolve grandes dificuldades matemáticas.

O encaminhamento seguido neste trabalho, foi o seguinte:

- Injetou-se traçador nos tanques de aeração e no decantador secundário em dias diferentes.
- Obteve-se as curvas-resposta dos equipamentos onde se fez a injeção
- Identificou-se o instante em que o traçador começava a ser re-injetado, através do reciclo de lodo por meio da curva Concentração x Tempo dos tanques de aeração, caso a injeção tenha sido realizada no decantador secundário (ponto C da figura 3.4). No caso em que a injeção de traçador fosse feita à entrada dos tanques de aeração, este instante era identificado através da curva Concentração X Tempo dada através de coleta de amostra nos dutos de retorno de lodo, pontos G e H, figura (3.4)

A Figura 4.2 mostra as curvas  $C \times t$  de uma experiência cuja injeção foi realizada nos tanques de aeração e identifica o início da re-injeção de traçador.

A influência da re-injeção foi retirada, ignorando-se a porção das curvas-resposta após o tempo identificado como início da re-injeção.

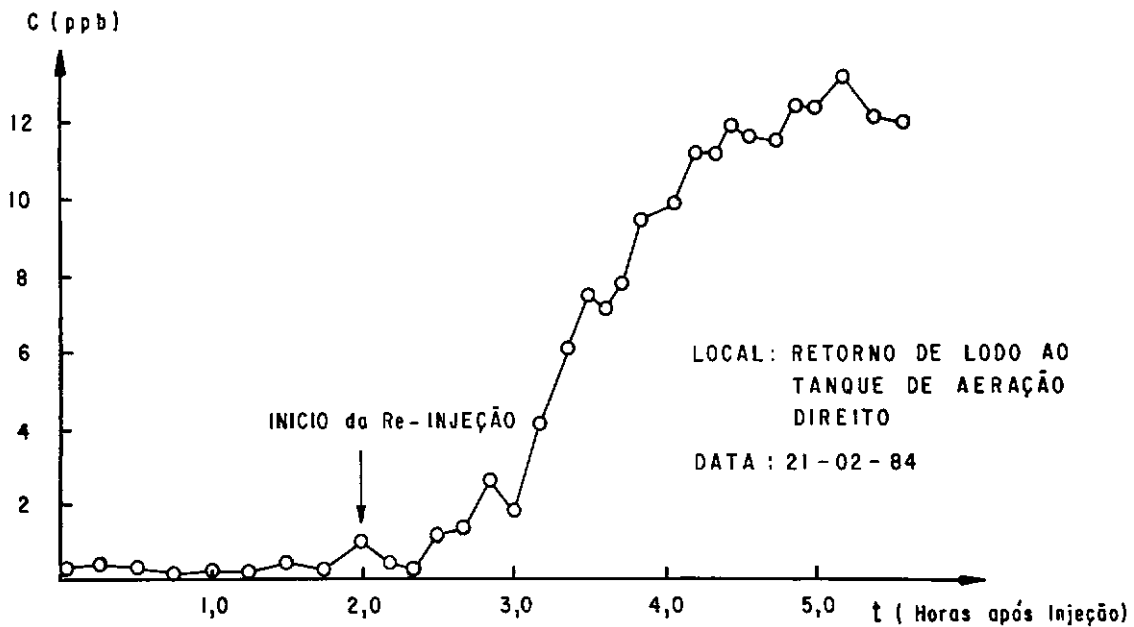
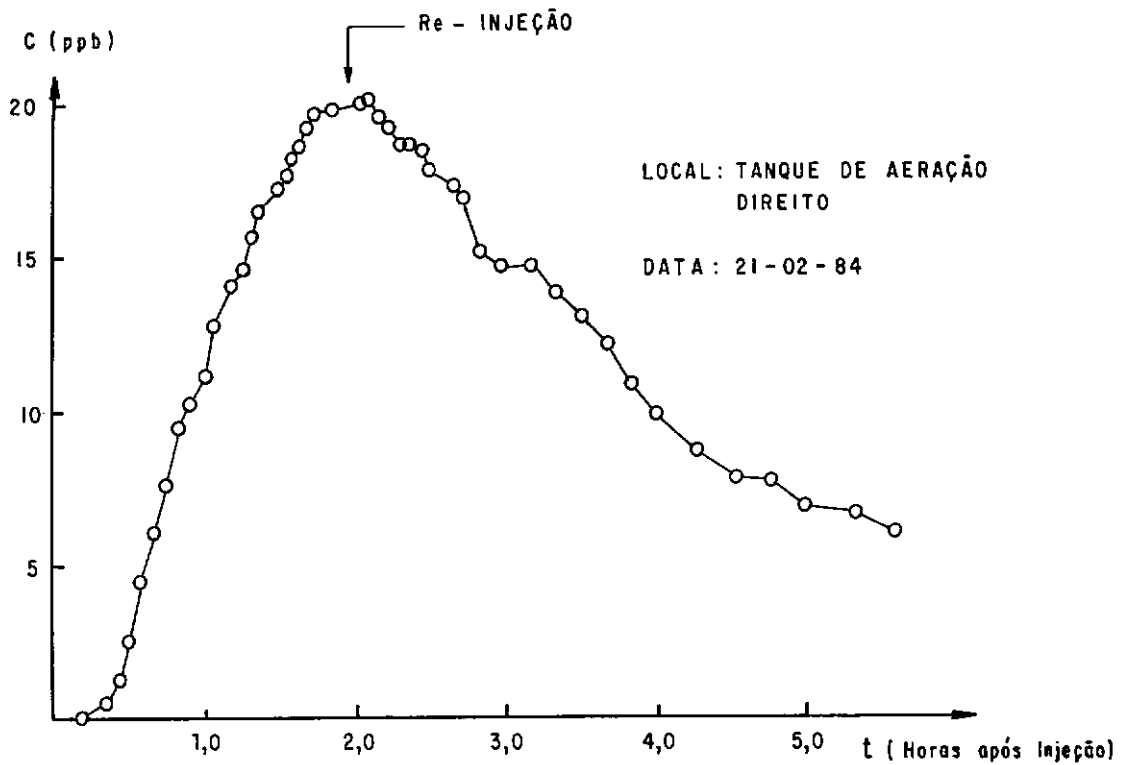


FIGURA 4.2 - Curvas - Resposta  $C \times t$  e identificação do início de re-injeção de traçador

A tabela a seguir, sumariza os tempos considerados como tempo de início de re-injeção de traçador nas diversas experiências de campo realizadas.

CÓDIGO DA EXPERIÊNCIA	DATA DE REALIZAÇÃO	$\bar{E}$ (*) (HORAS)	T (**) (HORAS)
AD1	31.08.83	2,75	3,77
AD2	13.12.83	2,50	2,86
AD3	25.01.84	2,50	5,27
AD4	21.02.84	2,00	4,40
AE4	21.02.84	2,50	4,40
AD5	27.03.84	1,85	2,54
AE6	27.03.84	1,85	2,54
DS1	29.08.83	3,00	0,65
DS2	31.10.83	3,00	0,55
DS3	10.01.84	2,50	0,65

\* Tempo após injeção considerado como início da re-injeção de traçador através do lodo ativado.

\*\* Tempo médio de residência operacional

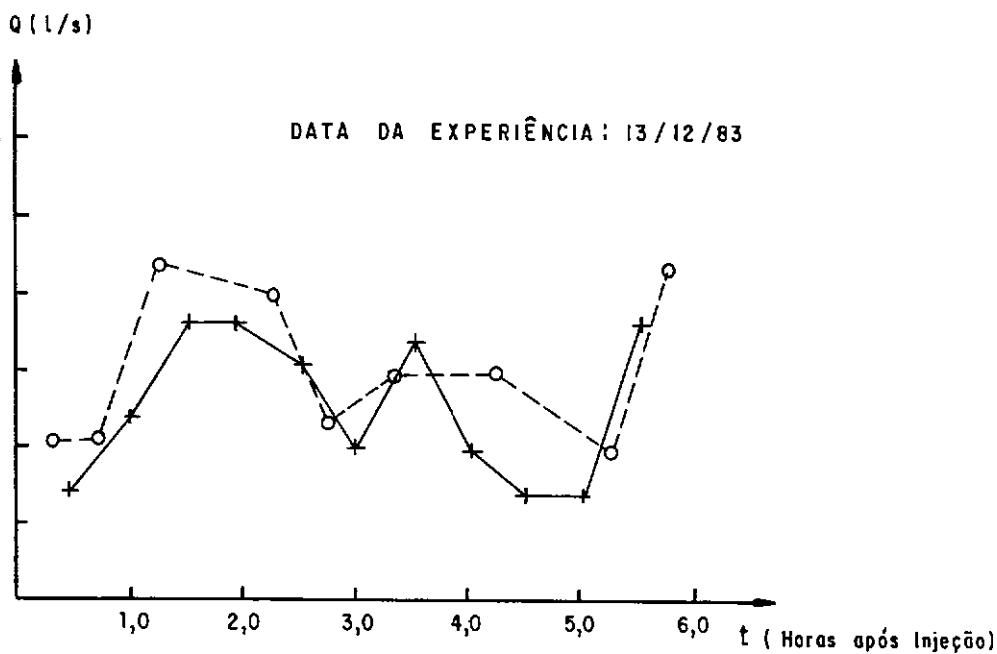
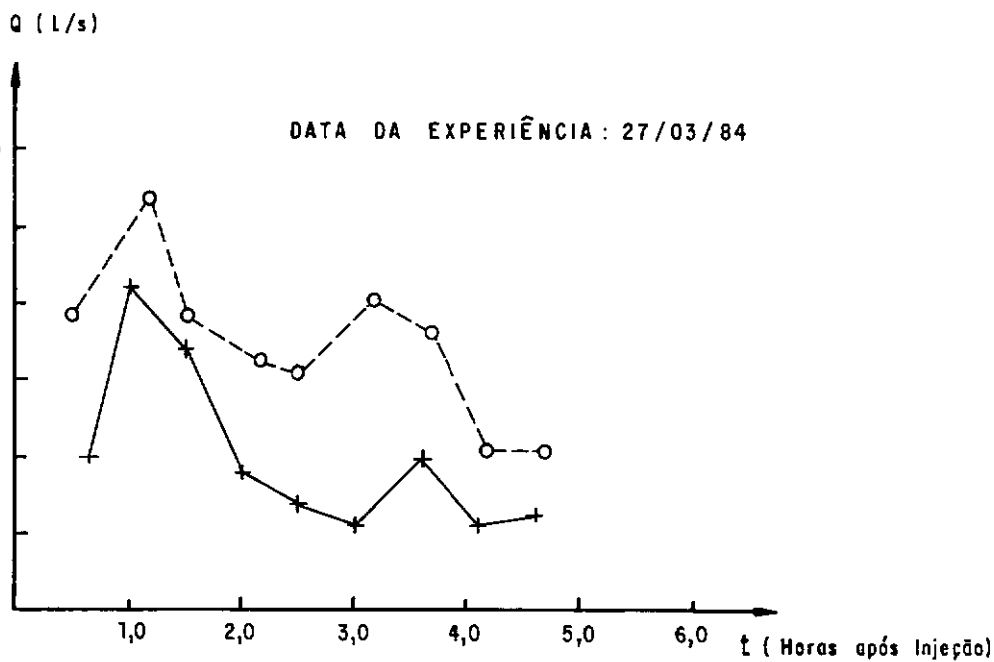
TABELA 4.1 Tempos de Início de Re-injeção de Traçador e Tempo Médio de Residência Operacional

Identificado o ponto onde a curva experimental não estava influenciada pelo reciclo de lodo, calculou-se a média das vazões de tratamento até este instante, obtendo-se assim novo tempo médio de residência operacional e novas curvas-resposta, as quais foram modeladas.

#### IV.2 Curvas Experimentais e Modelagem Teórica

Apresentamos nas Figuras (4.3) e (4.4) algumas hidrógrafas obtidas durante experiências realizadas em campo. Observa-se que as vazões medidas através do flutuador são superiores às aquelas obtidas no medidor Parshal. Isto se deve, talvez, ao fato de as velocidades do escoamento no canal efluente terem sido calculadas através do uso de flutuadores, conduzindo-nos a valores de velocidades maiores que a média e consequentemente a vazões superiores à média. Apesar da grande variação de vazões, observa-se adiante que houve uma reprodutibilidade razoável das curvas experimentais, principalmente às aquelas relativas aos tanques de aeração que são reatores cujo comportamento hidráulico são mais estáveis que os sedimentadores. Foi utilizada a média das vazões obtidas no medidor Parshal para o cálculo de  $T$  - tempo médio de residência operacional (Tabela 4.1), e este para a adimensionalização dos tempos na curva Concentração versus Tempo.

As figuras (4.5) e (4.6) mostram retas de calibração calculadas para alguns pontos de coleta de amostra em dias de realização de experiências de campo.



— VAZÃO MEDIDA NA CALHA PARSHAL

○ — ○ VAZÃO MEDIDA COM FLUTUADOR

FIGURA 4.3 - Variação de vazão durante experiências de campo

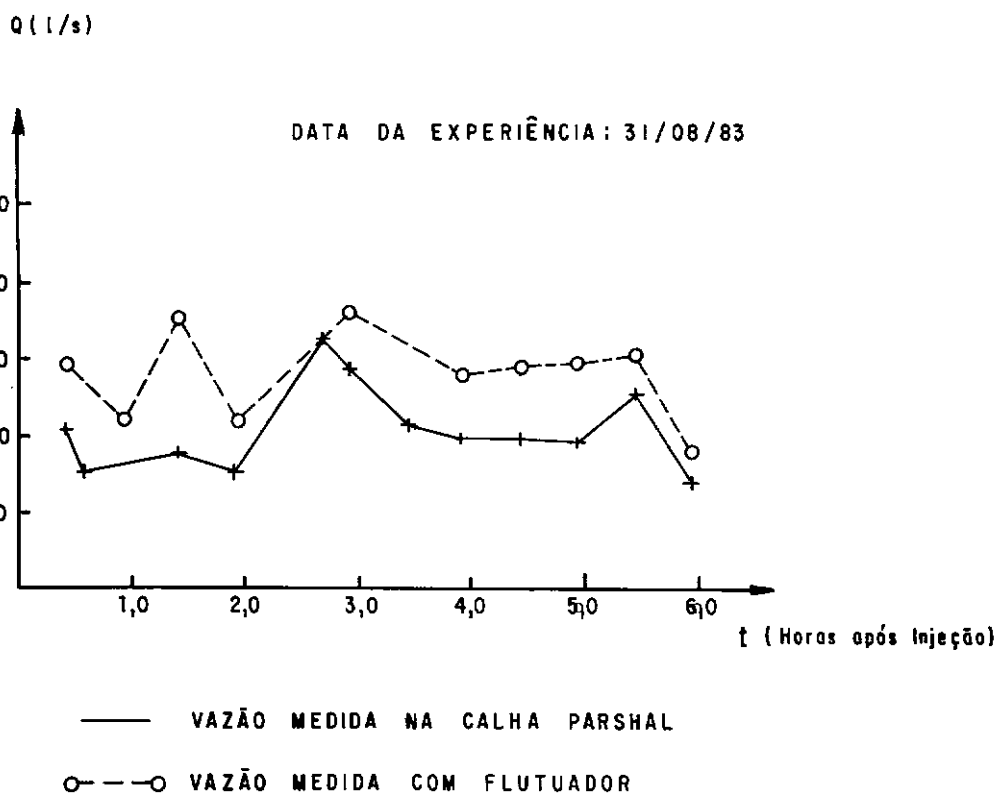
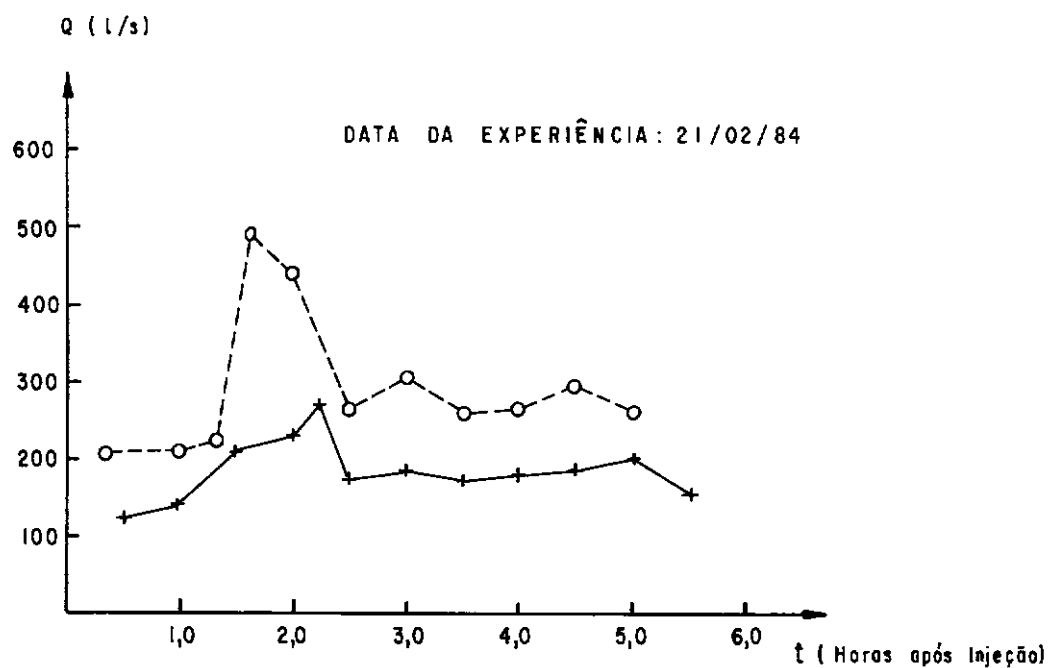
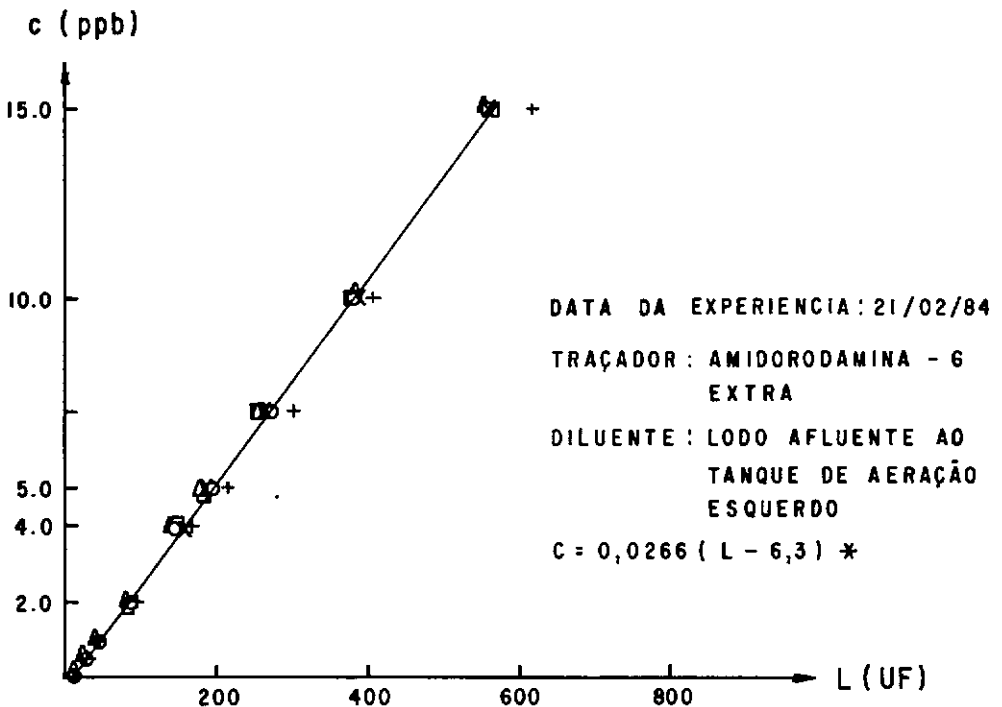
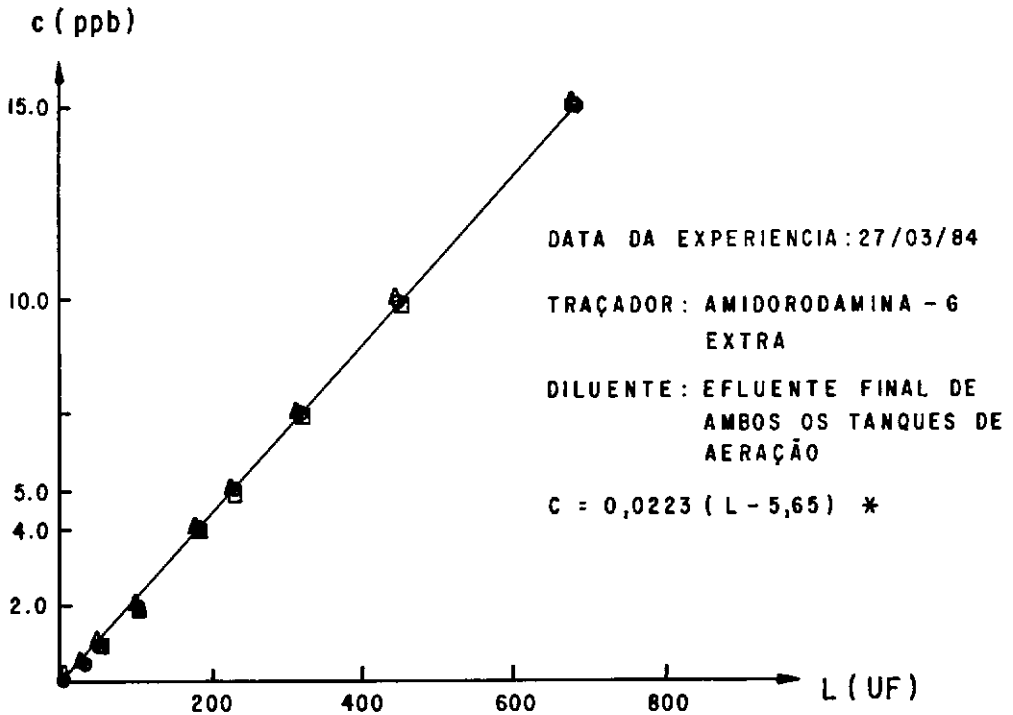


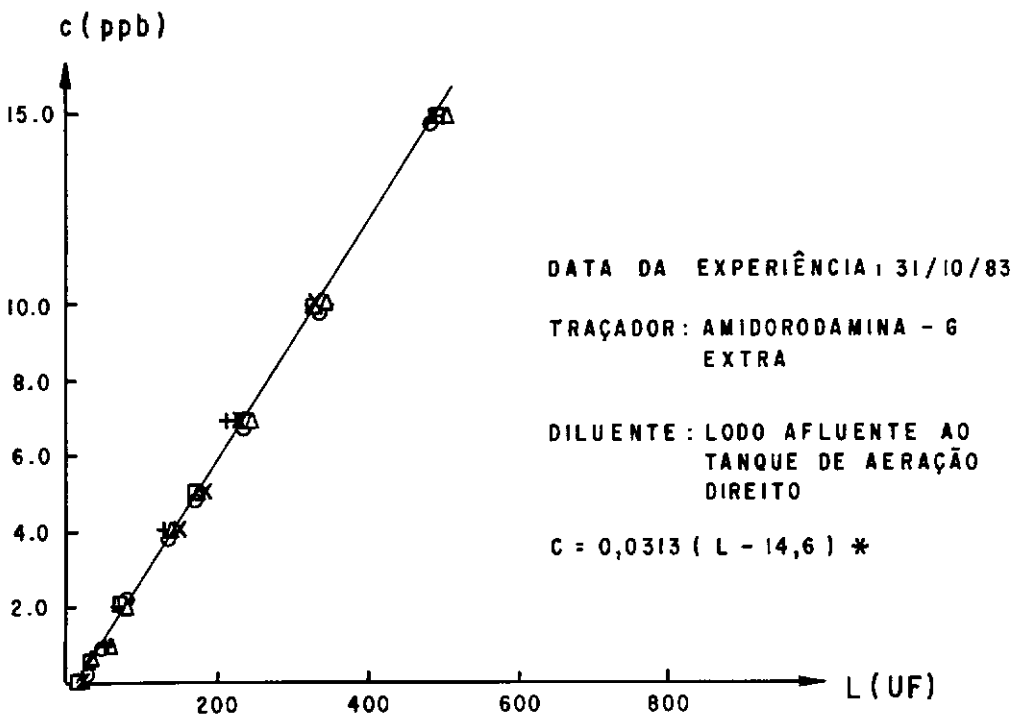
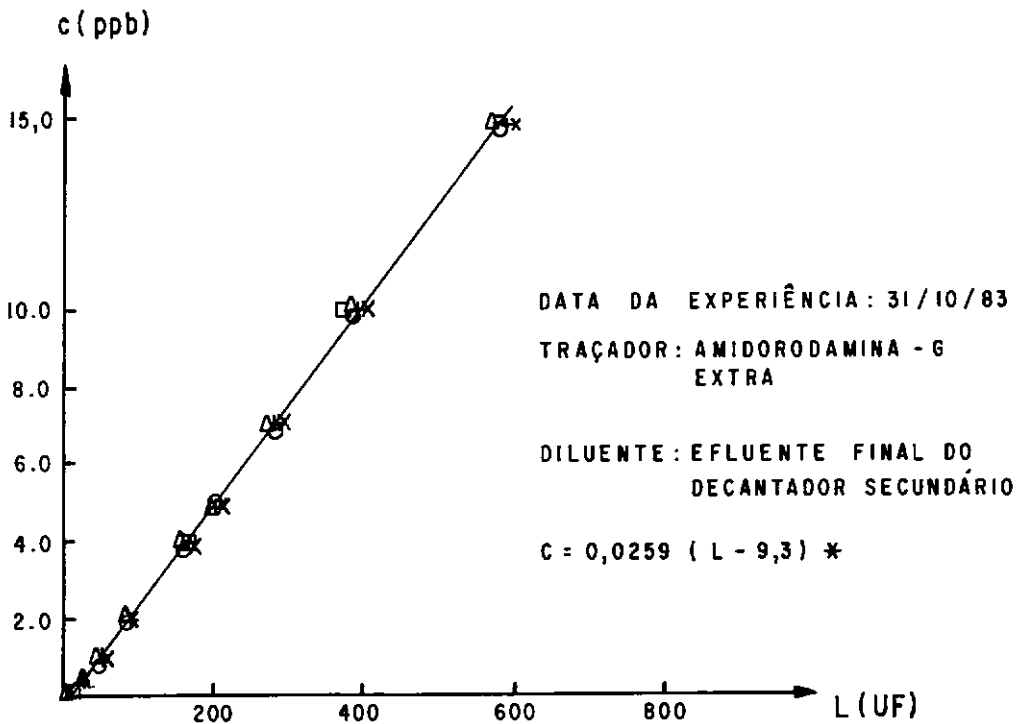
FIGURA 4.4 - Variação de vazão durante experiências de campo



\* EQUAÇÃO CALCULADA PELO MÉTODO DOS "MÍNIMOS QUADRADOS"

FIGURA 4-5 - Retas de Calibração





\* EQUAÇÃO CALCULADA PELO MÉTODO DOS "MÍNIMOS QUADRADOS"

FIGURA 4.6 - Retas de Calibração

#### IV.2.1 Tanques de Aeração

A injeção simultânea de traçador nos tanques de aeração direito e esquerdo conduziram a curvas-resposta bastante semelhantes. A figura (4.7) ilustra este fato, permitindo concluir que o comportamento destes reatores em termos de dispersão de traçador é bastante similar. Portanto, podemos considerar que o modelo teórico que melhor se ajusta a um dos tanques, é válido também para o outro.

Considerando-se a existência de cinco aeradores de superfície em cada um dos tanques de aeração estudado, imaginou-se que havia cinco regiões não delimitadas fisicamente no interior destes tanques, mas teoricamente limitadas pelo raio de influência de cada um dos aeradores de superfície. Por este motivo, tentou-se ajustar às curvas experimentais destes agitados com retromistura, em série.

Entende-se por retromistura uma recirculação do fluido no interior do tanque entre os volumes de ação de cada aerador de superfície.

A equação (IV.8) apresentada por HADDAD e WOLFF (15), representa este modelo para cinco reatores em série.

$$E(\theta) = 10w^6/w^2-1 \cdot \sum_{i=1}^5 (-1)^{i+1} \cdot \text{sen } \psi_i / (1+5 r_i) \cdot \exp (-5 \theta r_i) \quad (\text{IV.8})$$

onde:

$$r_i = 1 + 2(1+w \cos \psi_i)/w^2 - 1 \quad (\text{IV.9})$$

$$\phi_i = \arctan(\sin \psi_i / w - \cos \psi_i) \quad (\text{IV.10})$$

$$\phi_i = i\pi/2 - 3\psi_i \quad (\text{IV.11})$$

$$w = 1 + Q/q \quad (\text{IV.12})$$

onde:

$Q$  - vazão de alimentação

$q$  - vazão de retromistura

$\psi_i$  - raízes das equações (IV.10) e (IV.11)

HADDAD e WOLFF (15) propuseram um método gráfico para determinação de  $\psi_i$ . Basicamente, o método consiste em se traçar as curvas correspondentes às equações (IV.10) e (IV.11) e encontrar-se os valores de  $\psi_i$  relativos às suas interseções. Com os valores de  $\psi_i$  obtidos, calcula-se valores das raízes  $r_i$ , dados pela equação (IV.9). Com todos os valores de  $\psi_i$  e  $r_i$  definidos, fica também determinada a equação (IV.8) do modelo para um valor inicialmente arbitrado do parâmetro  $w$ . Os resultados obtidos para o ajuste das curvas experimentais não foram satisfatórios. Este insucesso, acredita-se, foi devido, em parte, às imprecisões gráficas e construtivas na utilização do método proposto. Por este motivo, estes ajustes não serão apresentados. Um caso particular do modelo definido por HADDAD e WOLFF (15) é o modelo com  $N$  reatores perfeitamente agitados em série com

zonas mortas. Este modelo foi descrito no Capítulo II, e é amplamente encontrado na literatura para análise do comportamento hidrodinâmico de reatores biológicos e consequente obtenção da curva de distribuição de tempos de residência; e no caso em estudo, foi o que melhor se ajustou à todas as curvas experimentais dos tanques de aeração. Os valores dos parâmetros: N, número de tanques em série, e m, fração de volume ativo que conduziram ao melhor ajuste foram respectivamente 3 e 1, para todas as curvas experimentais. Para se expressar quantitativamente os desvios entre as curvas teóricas e experimentais, calculou-se a relação dada pela equação abaixo:

$$\text{Desvio} = \frac{1}{N} \sum (E(\theta)_E - (E(\theta)_t)^2 \quad (\text{IV.13})$$

onde:

N = número de pontos experimentais

$E(\theta)_t$  = valores teóricos de  $E(\theta)$

$E(\theta)_E$  = valores experimentais de  $E(\theta)$

Os valores obtidos para N e m, permitem concluir que há um grau de mistura elevado no interior dos tanques de aeração e que não há zonas mortas compondo o volume total destes equipamentos. A seguir, Figuras (4.8), (4.9) e (4.10), são mostrados os ajustes deste modelo às porções das curvas experimentais não influenciadas pelo reciclo de lodo, e os desvios entre as curvas teóricas e as experimentais expressos pela equação (IV.13).

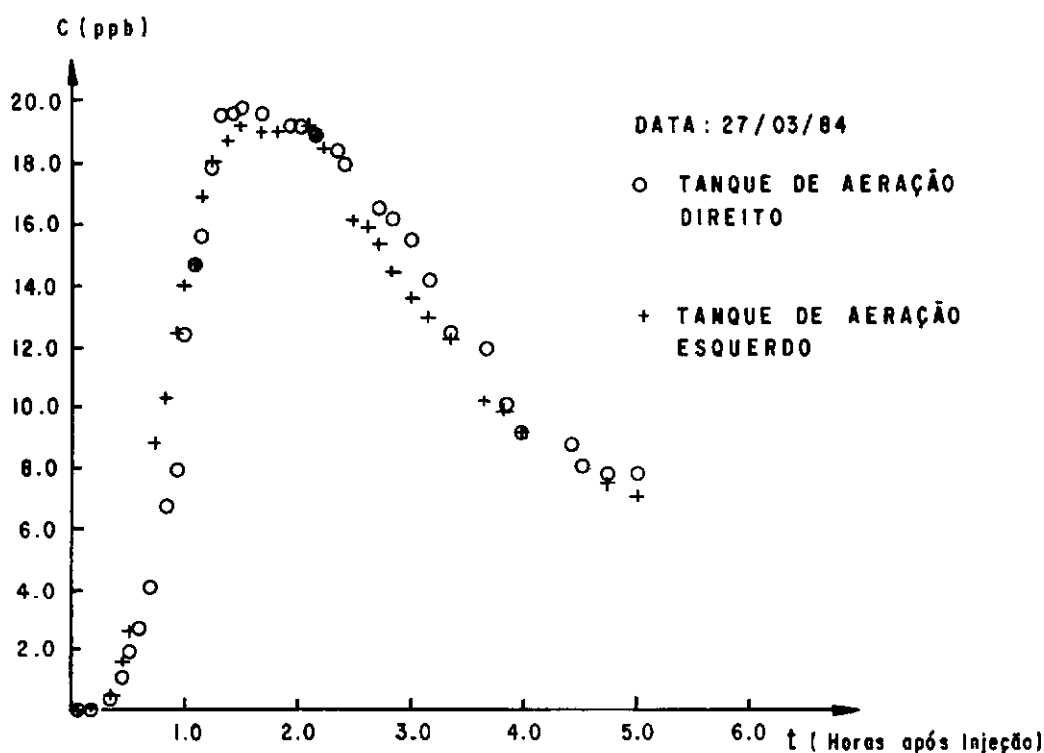
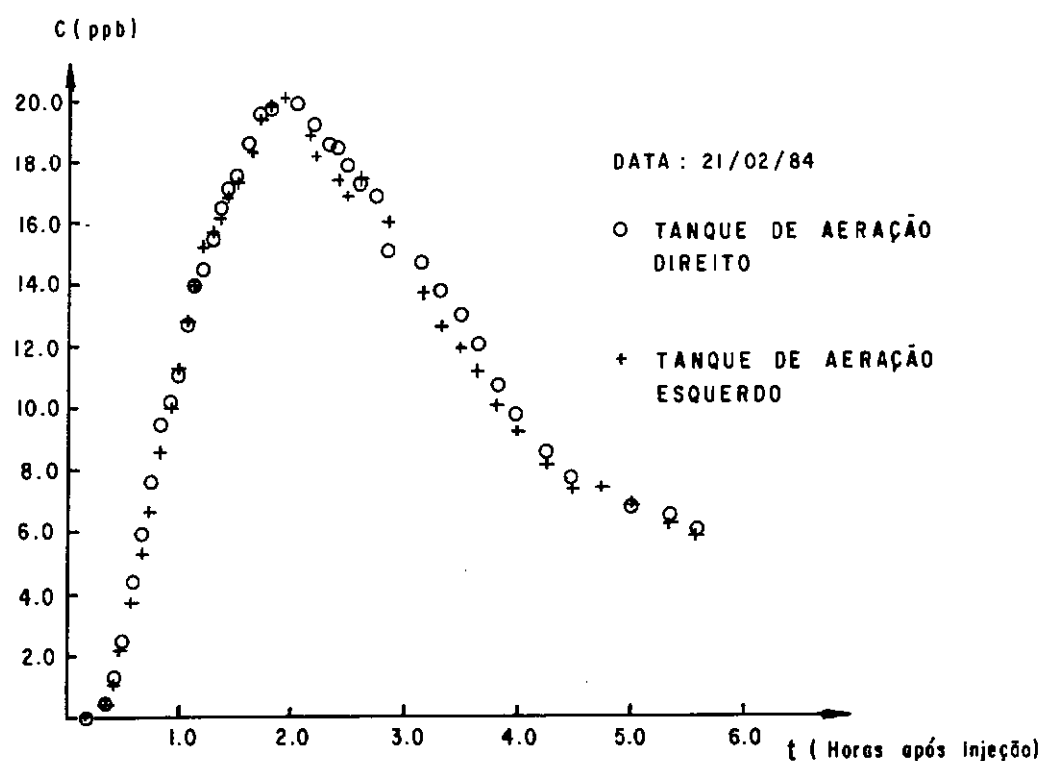


FIGURA 4.7 - Comparação entre Curvas Experimentais de ambos os Tanques de Aeração

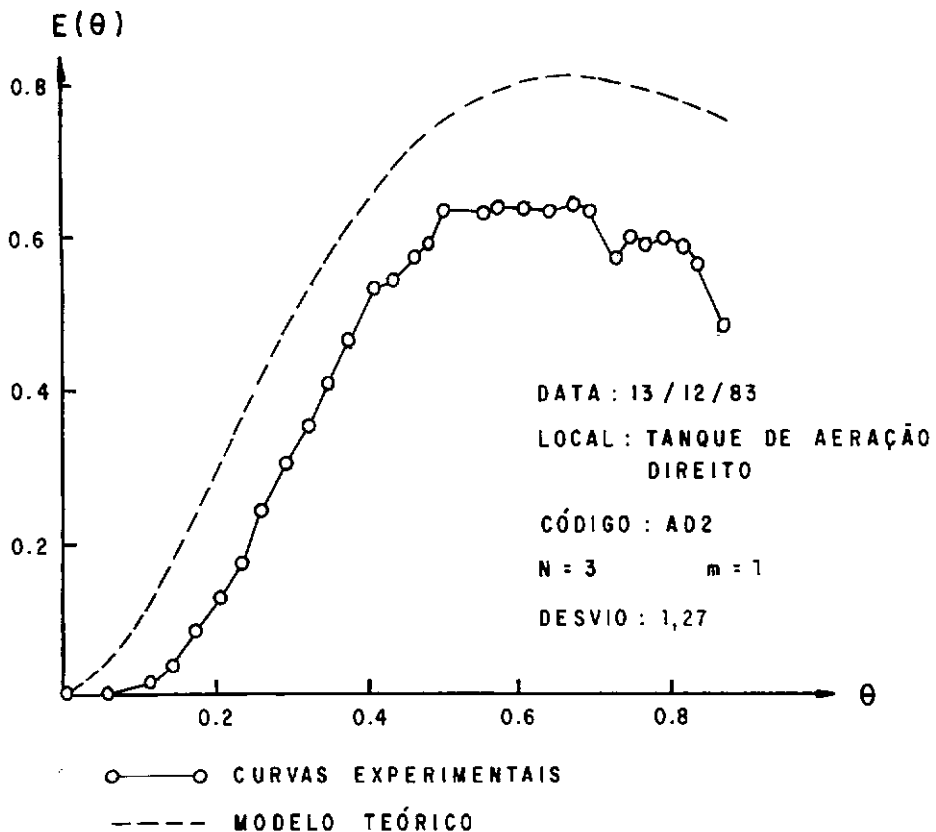
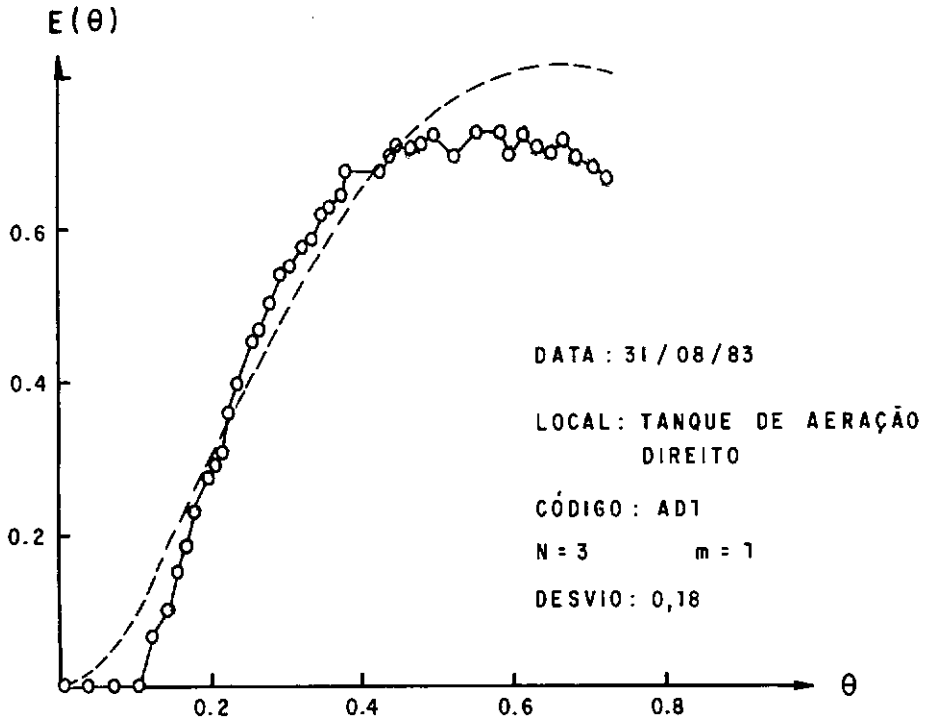
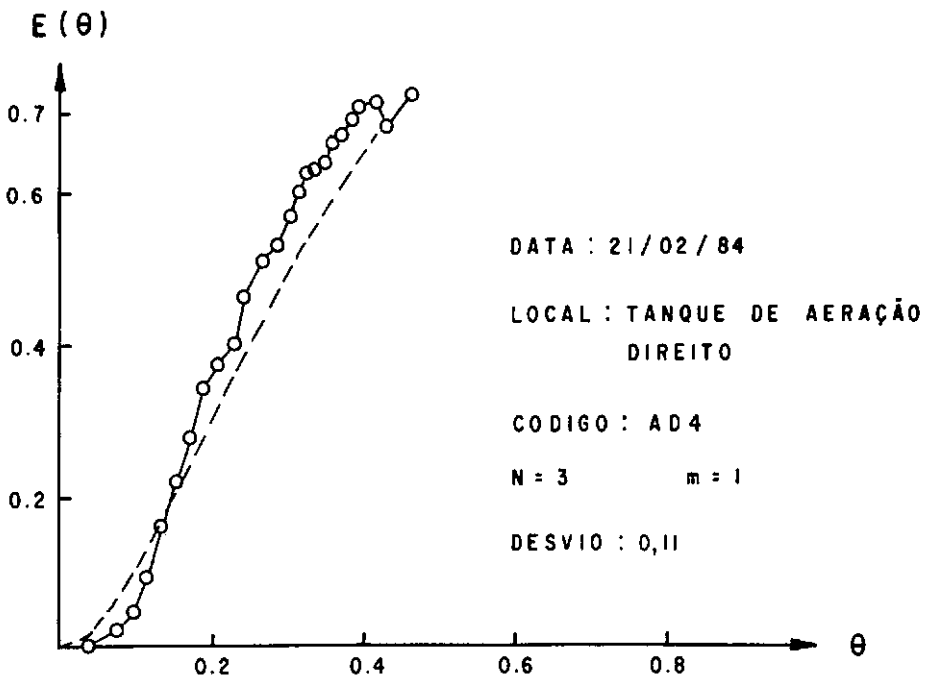
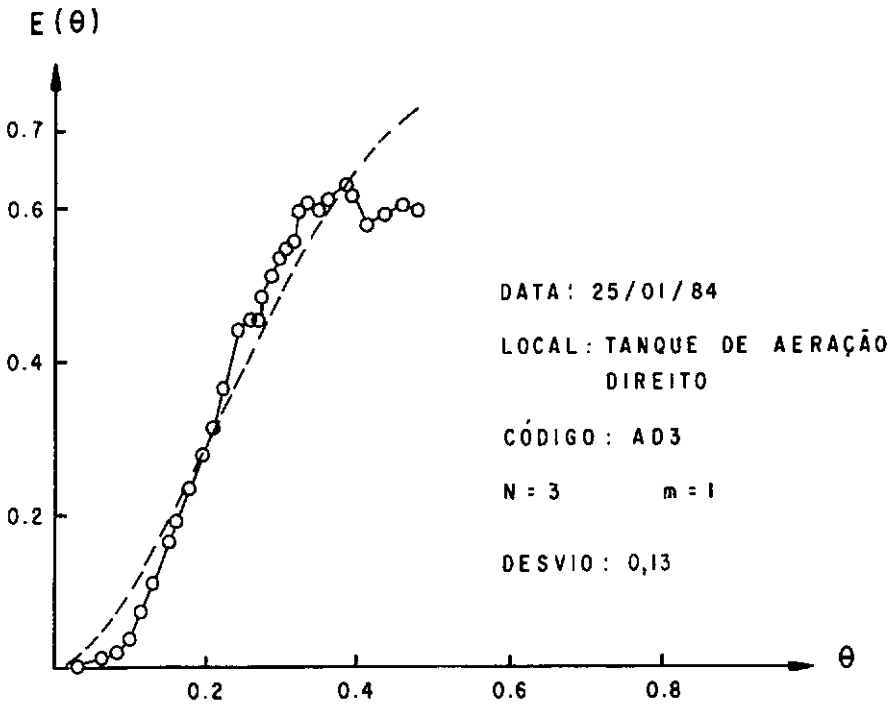


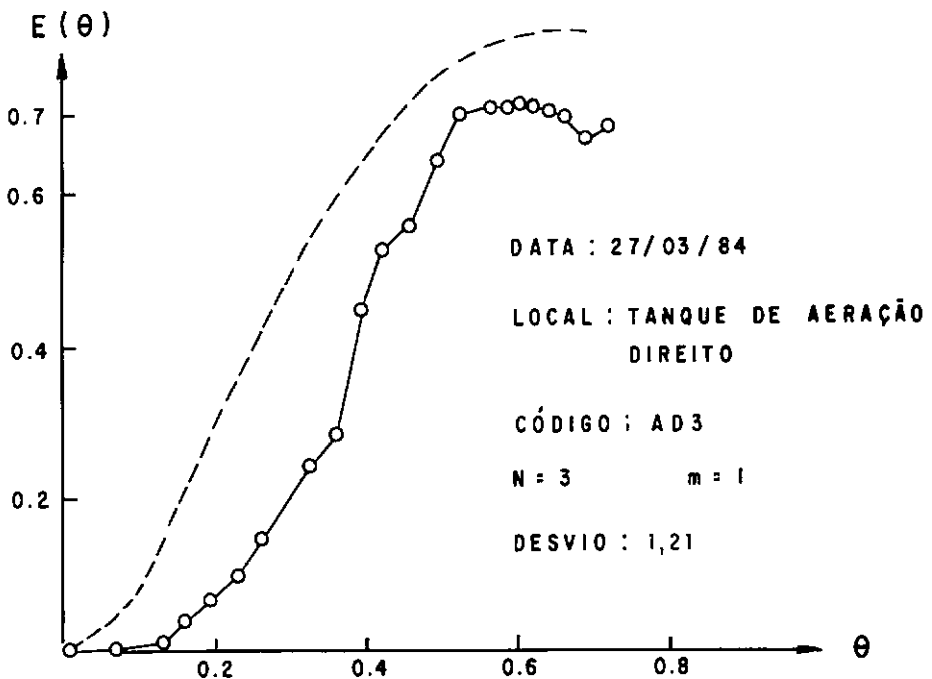
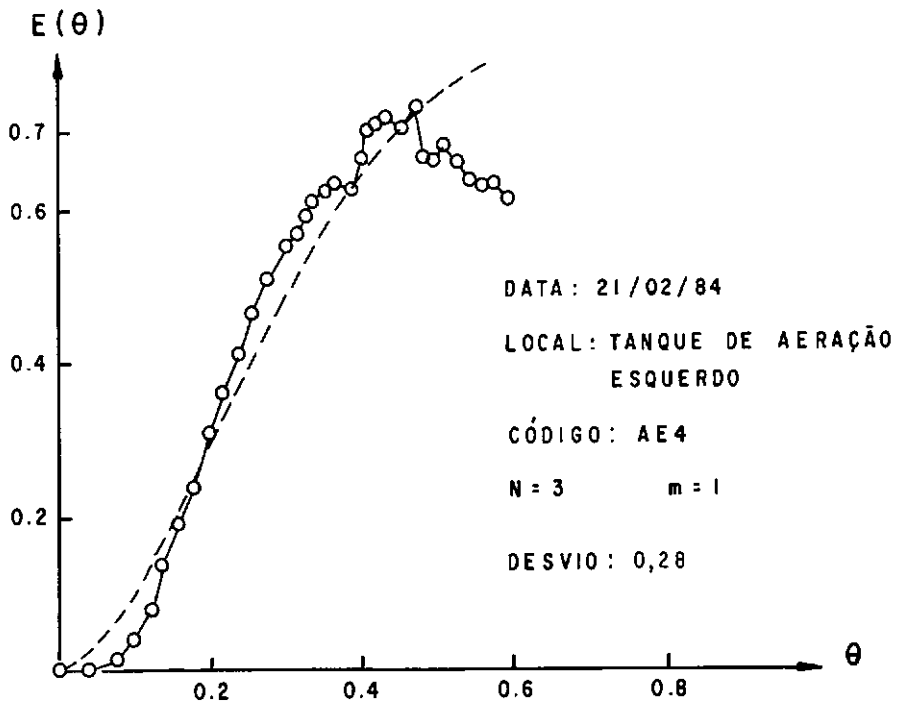
FIGURA 4.8 - Ajuste do Modelo Teórico às Curvas Experimentais



○—○ CURVAS EXPERIMENTAIS

--- MODELO TEÓRICO

FIGURA 4-9 - Ajuste do Modelo Teórico as Curvas Experimentais



○ — ○ CURVAS EXPERIMENTAIS  
 - - - - - MODELO TEÓRICO

FIGURA 4-10 - Ajuste do Modelo Teórico as Curvas Experimentais



#### IV.2.2 Sistema de Decantação Secundário

Como foi mostrado no capítulo anterior, o sistema de decantação foi por nós dividido em duas fases: o sobrenadante e o lodo, com base nos volumes que compõem as linhas de reciclo de lodo, no volume do tanque de decantação e no perfil de concentração de lodos no interior deste. Na realidade não existe uma delimitação perfeita entre a fase sobrenadante e o lodo, mas sim uma região, a partir da qual as concentrações de lodo começam a crescer com a profundidade. Para chegar-se à fração de volume correspondente à ambas as fases, analisou-se as curvas Concentração de Lodo versus Profundidade mostradas na figura (4.11). Considerando-se que as concentrações medidas até a profundidade de 1,0 m são iguais a zero, e tal profundidade, corresponde a aproximadamente 30% da total (3,2 m) do sedimentador, adotou-se o volume correspondente à 30% do volume da bacia de decantação (ítem 1 da tabela 3.1), somado ao volume de líquido contido na calha lateral desta, (ítem 2 da tabela 3.1), como volume de líquido na fase sobrenadante, obtendo-se  $530,6 \text{ m}^3$ . O volume correspondente a fase lodo foi calculado pela diferença entre o volume total do sistema de decantação igual a  $1727,0 \text{ m}^3$  e o volume de sobrenadante igual a  $530,6 \text{ m}^3$ .

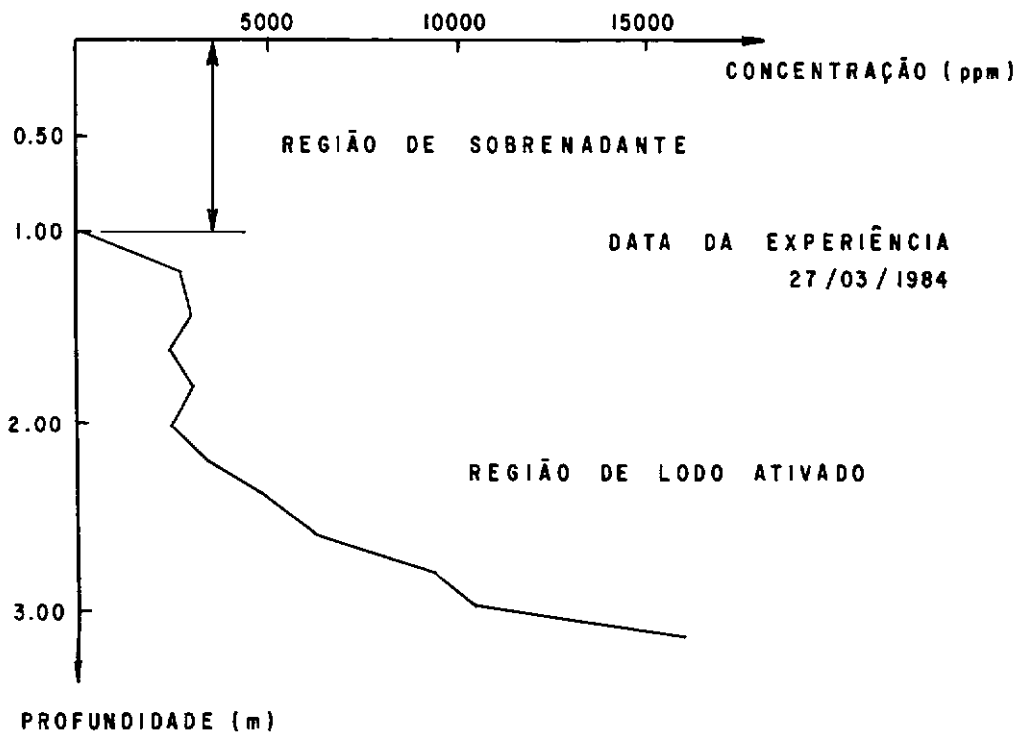
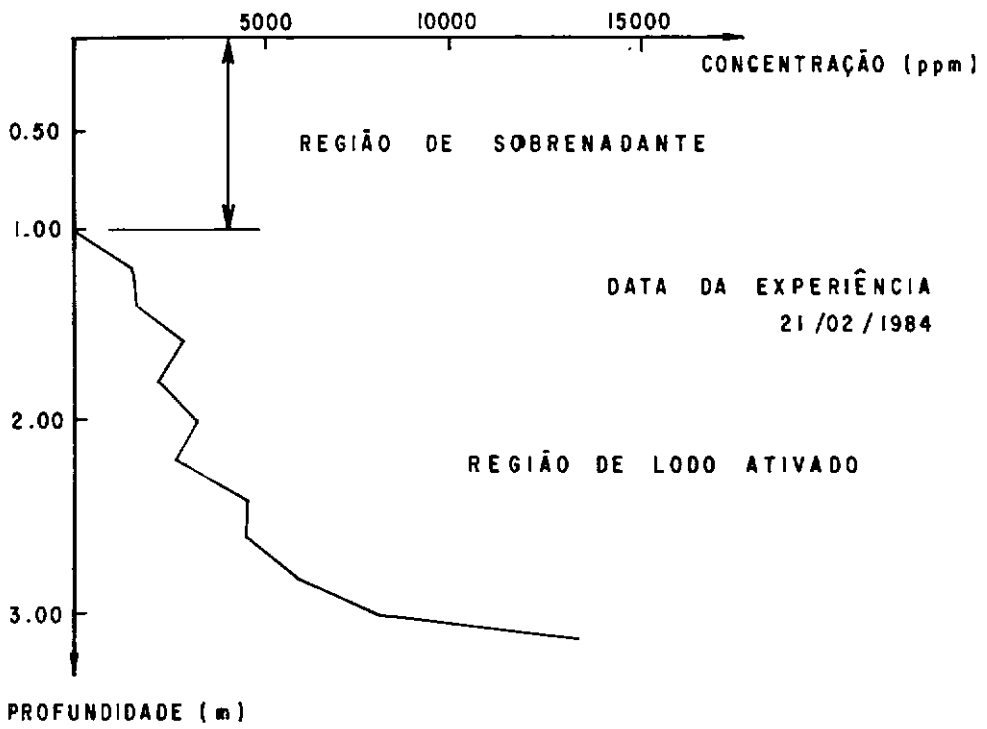


FIGURA 4.11 - Perfis de Concentração de Lodo Ativado no Decantador Secundário

Com relação à quantidade de traçador que se dispersa na fase lodo e na fase sobrenadante, foi adotado o critério de proporcionalidade de massa relativa à vazão de lodo recirculado e a vazão média de tratamento até o instante identificado como início da re-injeção de traçador no sedimentador. Assim utilizou-se as relações seguintes no cálculo da massa de traçador dispersa no lodo e no sobrenadante:

$$M_{SN} = \frac{M}{1 + r} \quad (IV.14)$$

$$M_L = \frac{r M}{1 + r} \quad (IV.15)$$

onde:

$M_{SN}$  = massa de traçador dispersa na fase sobrenadante

$r$  = taxa de reciclo de lodo ativado

$M_L$  = massa de traçador dispersa na fase lodo

$M$  = massa total injetada

Os volumes das fases sobrenadante e lodo, bem como as quantidades de traçador dispersas nestas respectivas fases ( $M_{SN}$  e  $M_L$ ) foram utilizados posteriormente para a adimensionalização das curvas experimentais para estes subsistemas do sistema de decantação, quando da injeção de traçador à entrada do sedimentador.

Para a modelagem teórica da fase sobrenadante, foi utilizado o modelo PCSTR apresentado no capítulo II. A figura (4.12) é uma possível representação do escoamento suposto

neste modelo, que corresponde a dois volumes em mistura perfeita e um volume com escoamento pistão, em série. Imaginou-se que há uma região próxima à entrada do líquido onde existe uma certa perturbação do escoamento provocando certo grau de turbulência. Próximo à superfície livre do líquido supos-se que também há um certo grau de mistura, bem como na calha periférica e nas imediações do vertedouro onde há uma convergência das linhas de corrente do escoamento. Em uma região intermediária entre estas duas anteriores, supos-se que o escoamento se desse à velocidades mais uniformes, podendo ser representado por um escoamento do tipo pistão.

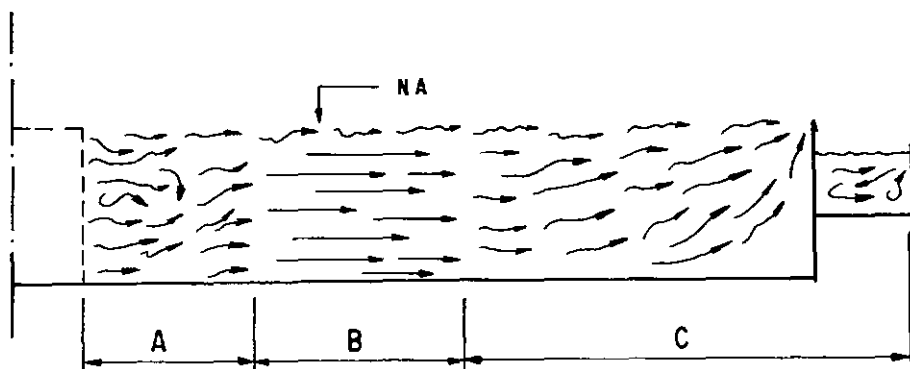
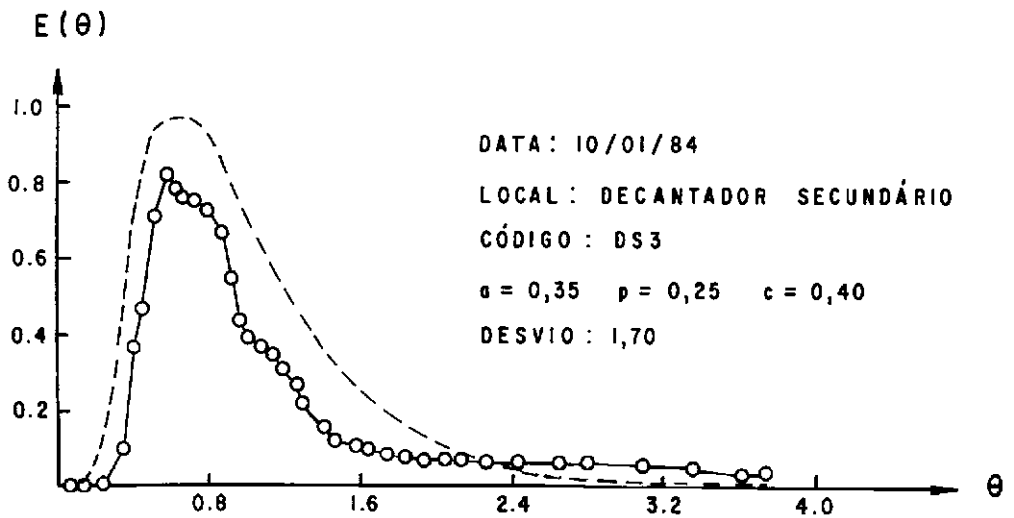
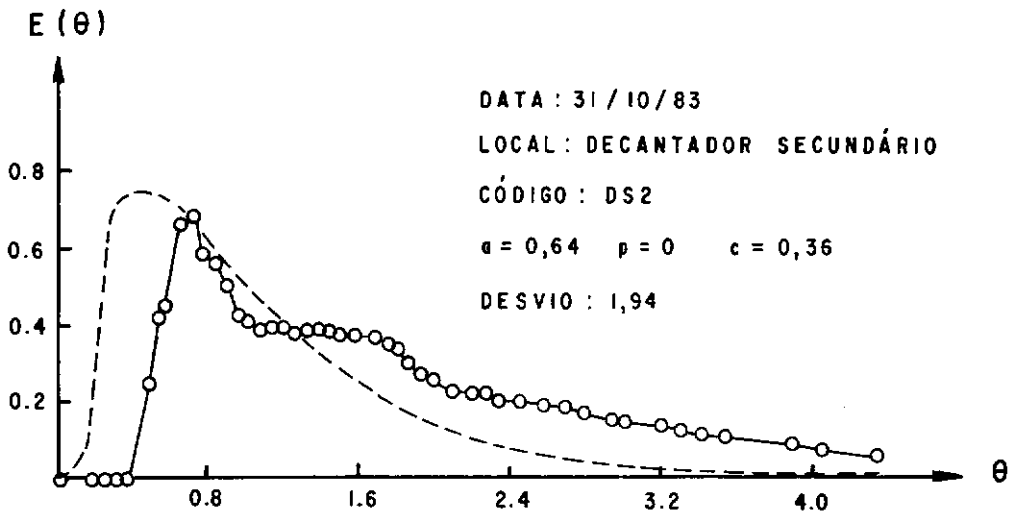
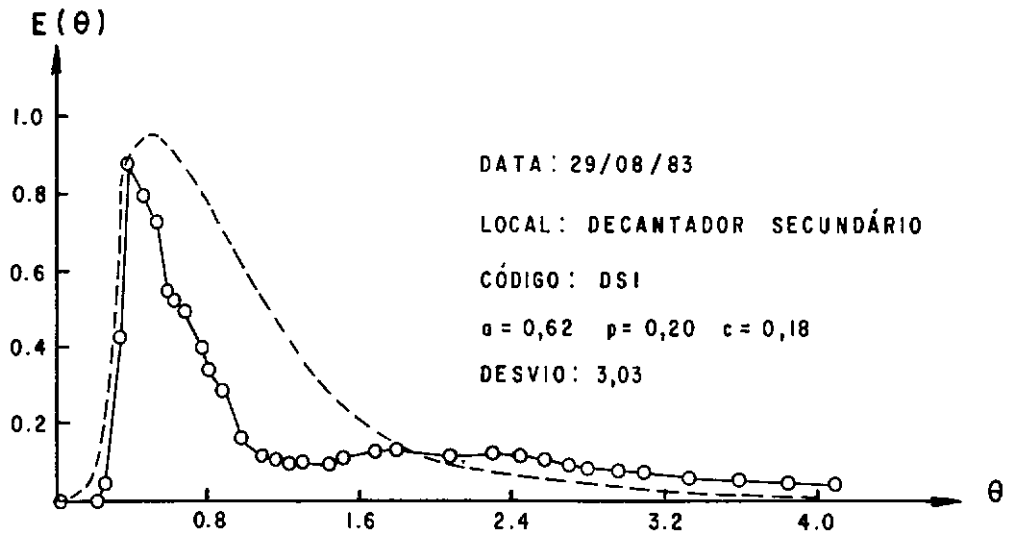


FIGURA 4-12 - Escoamento Teórico na Fase Sobrenadante

As regiões definidas pelos segmentos A e C na figura (4.12) se comportariam como mistura perfeita, e a região B como escoamento pistão.

Os parâmetros do modelo PCSTR quantificam percentualmente os volumes destas regiões. A figura (4.13) ilustra o ajuste deste modelo às curvas experimentais. Com relação aos valores dos parâmetros que conduziram ao melhor ajuste das curvas experimentais, mostrados na Tabela 4.2, percebe-se que existe um volume relativamente elevado na fase sobrenadante em que ocorre um alto grau de mistura. Esta mistura nem sempre se traduz por intensa agitação e turbulência, mas, às vezes, pela facilidade com que o traçador se dispersa no volume de líquido. Este parece ser o caso do líquido sobrenadante no decantador secundário.

Os distúrbios frequentes e a instabilidade inerente que caracterizam os processos de sedimentação causam sérios problemas quando são utilizados traçadores para avaliação do comportamento hidráulico destes equipamentos. A quase contínua variação de vazões, mudanças na densidade do esgoto afluente e condições climáticas, e uma possível operação descontinua de remoção de lodo do sistema, afetam e facilmente modificam o modelo de escoamento, reduzindo a reprodutibilidade dos testes. Este fato é mais difícil de ocorrer em tanques de aeração, uma vez que existe uma agitação forçada intensa e contínua do líquido, o que ocasiona uma espécie de "amortecimento" das perturbações mencionadas.



○ — ○ CURVAS EXPERIMENTAIS

----- CURVAS TEÓRICAS

FIGURA 4-13 - Curvas Resposta Experimentais e Teóricas

CÓDIGO	DA	PARÂMETROS DO MODELO			DESVIO
EXPERIÊNCIA	DATA	a	p	c	
DS1	29.08.83	0,62	0,20	0,18	48,49
DS2	31.10.83	0,64	0,00	0,36	44,68
DS3	10.01.84	0,35	0,25	0,40	32,39

TABELA 4.2 Valores dos Parâmetros do Modelo PCSTR

Com relação ao escoamento da fase lodo do sistema de decantação, sua representação pôde ser tratada através de um modelo de N tanques em série perfeitamente agitados com zonas mortas. Os altos valores do parâmetro N, 10 e 8, indicam que o grau de mistura nesta região é baixo. Isto pode ser justificado talvez pelo fato de que haja uma estratificação do lodo dentro do decantador secundário provocando uma maior uniformidade das velocidades do escoamento nesta fase. Sabe-se que quanto maior o número de tanques em série perfeitamente agitados, mais próximo estará o escoamento do modelo pistão.

Quanto aos valores do parâmetro correspondente a volume ativo, m, que variou de 67% a 88%, percebe-se que há alguma fração do volume total em que o traçador não tem acesso, isto é, existem zonas mortas na fase lodo.

A Figura (4.14) mostra o ajuste deste modelo às curvas experimentais da fase lodo do sistema de decantação e a Tabela 4.3 fornece os valores dos parâmetros que conduziram a este ajuste.

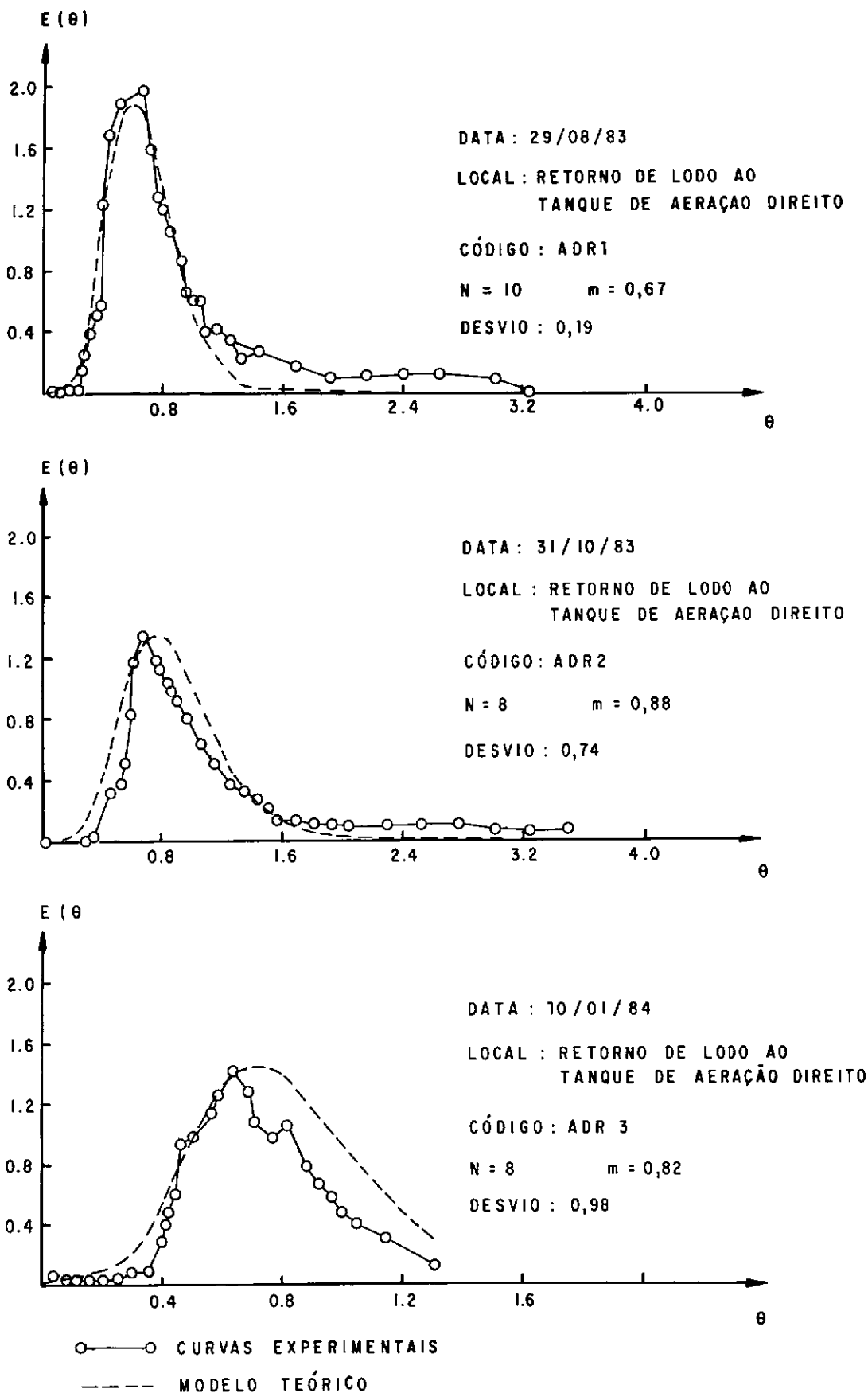


FIGURA 4.14 - Ajuste do Modelo Teórico às Curvas Experimentais



CÓDIGO DA EXPERIÊNCIA	DATA	PARÂMETROS DO MODELO		DESVIO
		N	m	
ADR1	29.08.83	10	0,67	3,43
ADR2	31.10.83	8	0,88	12,60
ADR3	10.01.84	8	0,82	18,73

TABELA 4.3 Parâmetros de Ajuste do Modelo da Fase Lo  
do Ativado

Os resultados do teste com traçador radioativo são apresentados adiante. As sondas de cintilação localizadas nos pontos D, E e F - ver figura 3.4 - apresentaram defeito por este motivo não serão apresentadas as curvas referentes a estes pontos. Considerou-se que o traçador Br-82 não sofre adsorção em sólidos em suspensão, por apresentar sua fórmula química - Brometo de Potássio - estável e pouco sensível a este fenômeno. Considerou-se também que a curva resposta obtida com este traçador expressa com confiabilidade o escoamento no interior dos tanques de aeração.

Analisando a figura 4.15 verificamos a quase total superposição das curvas experimentais dos traçadores Amidorodamina G Extra e Br-82. Com isto, podemos concluir que o traçador fluorescente apresentou resultados confiáveis quanto ao escoamento no interior dos tanques de aeração para o caso da experiência realizada em 27.03.84. Se considerarmos que todas as curvas relativas aos tanques de aeração foram razoa

velmente bem representadas pelo modelo de 3 reatores perfeitamente agitados em série, podemos concluir que o traçador fluorescente Amidorodamina G Extra pode ser usado com bom grau de segurança para representar escoamentos com forte carga de sólidos em suspensão tais como o existente em tanques de aeração.

AZEREDO (13), estudando diversos traçadores, os quais foram injetados no decantador primário da ETIG, comprovou, através de balanço de massa, que o traçador fluorescente Amidorodamina G Extra apresenta menor grau de adsorção.

O ideal seria que em todas as experiências, fossem injetados ambos os traçadores simultaneamente, mas devido aos altos custos de irradiação e transporte, e aos poucos reursos disponíveis, isto não foi possível.

A seguir, apresentamos as curvas experimentais, obtidas com os traçadores fluorescente e radioativo.

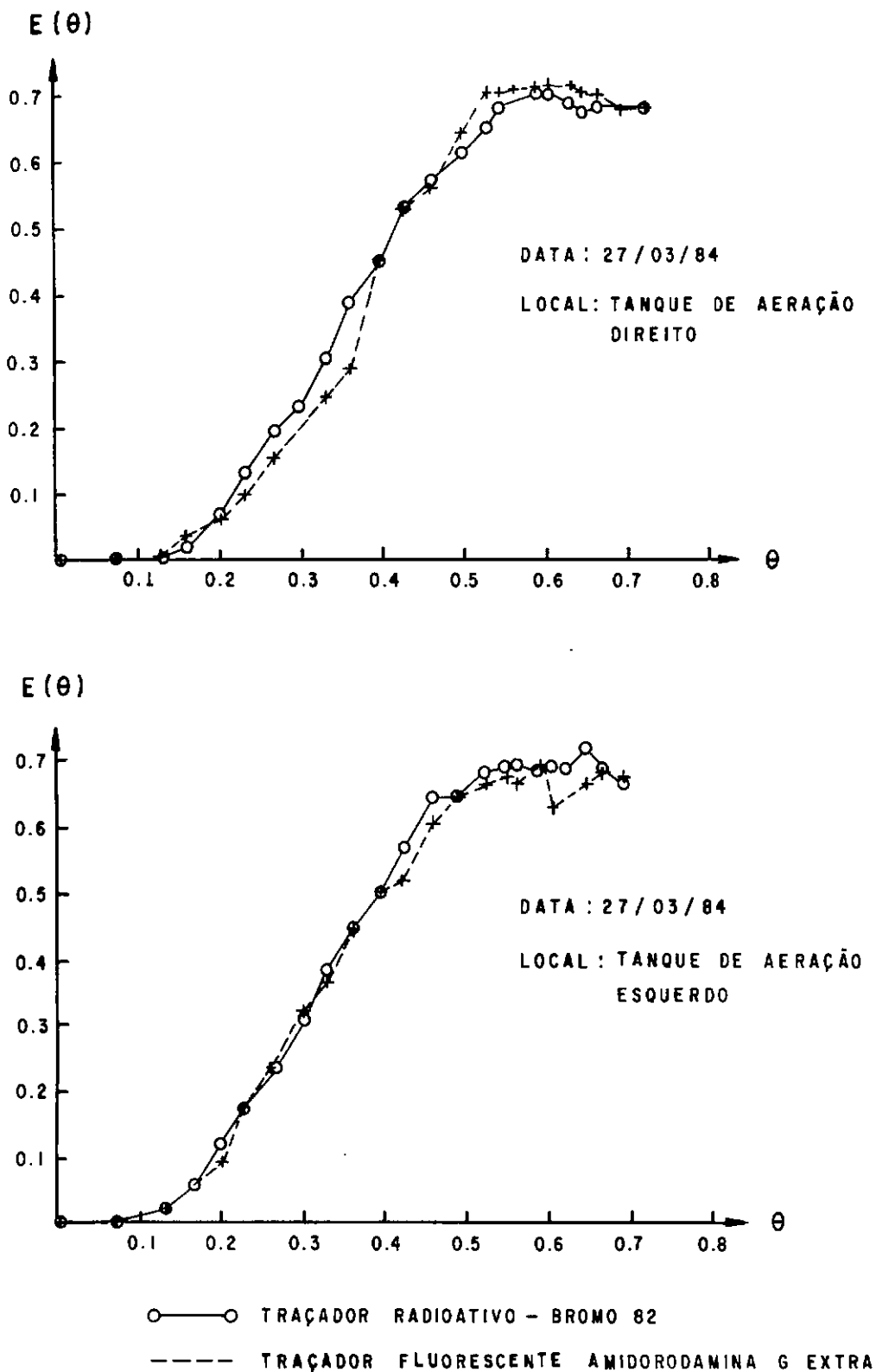


FIGURA 4-15 - Comparação das Curvas Experimentais de Traçador Fluorescente e Radioativo

## C\_A\_P\_Í\_T\_U\_L\_O V

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo hidrodinâmico dos equipamentos da Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador realizados neste trabalho e a análise dos modelos empregados para representar as curvas experimentais obtidas, conduziram às seguintes conclusões e recomendações:

- O traçador fluorescente Amidorodamina G Extra mostrou-se um traçador confiável, com resultados comparáveis ao traçador radioativo Bromo-82, com as vantagens de menor custo e ausência de cuidados especiais no que se refere a proteção radiológica.
- Constatou-se a influência de sólidos em suspensão sobre a fluorescência do traçador (espectrofluorimetria). Apresentou-se neste trabalho um procedimento para detecção desta influência. (APENDICE I)
- Os testes realizados em ambos os tanques de aeração indicaram que eles apresentam idêntico comportamento hidrodinâmico. Apesar de serem munidos de 5 aeradores de superfície, o comportamento de mistura afasta-se do modelo ideal de mistura perfeita. O modelo que se mostrou mais adequado foi: Três Reatores em Série com Mistura Perfeita.
- O sedimentador foi subdividido em duas regi

ões: sobrenadante e lodo ativado com linhas de reciclo. Quanto ao sobrenadante, foi constatado que o traçador se dispersava rápida e facilmente por este volume de líquido, o que se traduziu por curvas-resposta que puderam ser aproximadas por modelos de 2 tanques agitados em série com um volume em escoamento pistão. Quanto ao lodo de fundo e linhas de reciclo, pôde-se verificar um baixo grau de mistura e presença de zonas mortas constatado pelo elevado número de tanques agitados em série (10 e 8) e pelo parâmetro  $m$  (0,67; 0,88 e 0,82) que denota a fração de volume ativo no modelo empregado que conduziu ao melhor ajuste das curvas experimentais.

- A variação de vazão existente durante as experiências de campo contribuiu para dificultar a aplicação dos modelos, cuja validade se dá para regimes permanentes.

- Apesar das limitações, este trabalho desenvolve uma metodologia de aplicação de traçadores em sistemas complexos, com correntes de recirculação, sedimentos em suspensão, flutuações de vazão e dimensões de equipamentos de porte industrial.

- Um maior número de testes com traçador radioativo deve ser realizado para comparação das curvas experimentais dos equipamentos e análise mais fundamentada sobre a confiabilidade do traçador fluorescente Amidorodamina G Extra quanto a sua não adsorção em sólidos em suspensão.

- A realização de testes em modelos reduzidos dos equipamentos analisados deve ser feita, principalmente no que diz respeito a fase sobrenadante do decantador secundário que parece ser a região mais sensível quanto à variação do  $t_i$

po de escoamento.

# BIBLIOGRAFIA

- 01 - ROUSTAN, M. - Modeles Mathematiques des Ecoulements Dans Les Reacteurs. Publication Didatique INSA - Toulouse - 1978.
- 02 - OCTAVE LEVENSPIEL - Chemical Reactions Engineering. An Introduction to the Design of Chemical Reactors. JOHN WILEY AND SONS, INC.
- 03 - HIMMELBLAU, D. M; BISCHOFF, K. B. - Process Analysis and Simulation: Deterministic Systems. JOHN WILEY AND SONS, INC.
- 04 - ELMALEH, S.; BEN AIM, R. - Representation de l'Ecoulement Macroscopique dans un Bassin d'Aeration par une Cascade de deux Melangeurs Parfaits Inegaux. The Chemical Engineering Journal, 1975, v.9, pp 107 - 114
- 05 - MURPHY, K. L.; TIMPANY, P. L. - Design and Analysis of Mixing for an Aeration Tank. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1967, oct., v.93, No. SA5, pp 1 - 15.
- 06 - DANCKWERTS, P. V. - Continuous Flow Systems: Distribution of Residence Times. Chemical Engineering Science, 1953 , Feb., v.2, No. , pp 1 - 13.
- 07 - SANT'ANNA JR., G. L. - Contribution a l'Etude de l'Hydrodynamique des Reacteurs Biologiques Utilizes en Traitement des Eaux Usees. Thèse Dr. Ing. L'Institut National des Sciences Appliquees de Toulouse.

- 08 - FREDERICK, L. H.; SANTOSH, K. G. - Hydraulic Analysis of Model Treatment Units. Journal of the Environmental Engineering Division, 1978, Aug., v.104, No EE4, pp 785-798.
- 09 - MURPHY, K. L.; BORIS, I. B. - Longitudinal Mixing in Spiral Flow Aeration Tanks. Journal of the Sanitary Engineering Division. 1970, April, v.96, No SA2, pp 211-221.
- 10 - LESLIE, W. F. - The Use of Tracers in Sedimentation Studies, Tese de Mestrado, McMaster University, Hamilton, Ontário, Nov., 1969.
- 11 - REBHUN, M.; ARGAMAN, Y. - Evaluation of Hydraulic Efficiency of Sedimentation Basins. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1965, Oct., v.91, No SA5, pp 37 - 45.
- 12 - RISTO, K. - The Applicability of Tracer Techniques for Studies on Sewage Treatment Process Dynamics. International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1977, v.28, pp. 833 - 837.
- 13 - AZEREDO, S. V. - Modelagem Hidrodinâmica de Decantador Primário de Esgotos utilizando-se a técnica de Traçadores - Tese de Mestrado de Sergio Vasconcelos de Azevedo, Março de 1985.
- 14 - MANUAL DE INSTRUÇÕES E OPERAÇÃO - ESPECTROFLUORÍMETRO JY 3.



- 15 - HADDAD, A. H; WOLF, D. - Residence Time Distribution Functions for Multi-Stage Systems with Backmixing  
The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1967,  
Apr., v.45, pp 100 - 104.

## APENDICE I

INFLUENCIA DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO SOBRE  
A FLUORESCÊNCIA

Com o objetivo de se avaliar o efeito dos sólidos em suspensão existentes nos diversos equipamentos analisados sobre a fluorescência do traçador Amidorodamina G Extra foi feita a análise espectrofluorimétrica das várias retas de calibração obtidas quando das experiências de campo, em dias diferentes.

Preparou-se concentrações padrões do traçador em estudo, tendo como diluente água destilada, realizando-se também análises espectrofluorimétricas destas concentrações em dias diferentes. A figura 1 mostra as análises obtidas para o diluente água destilada.

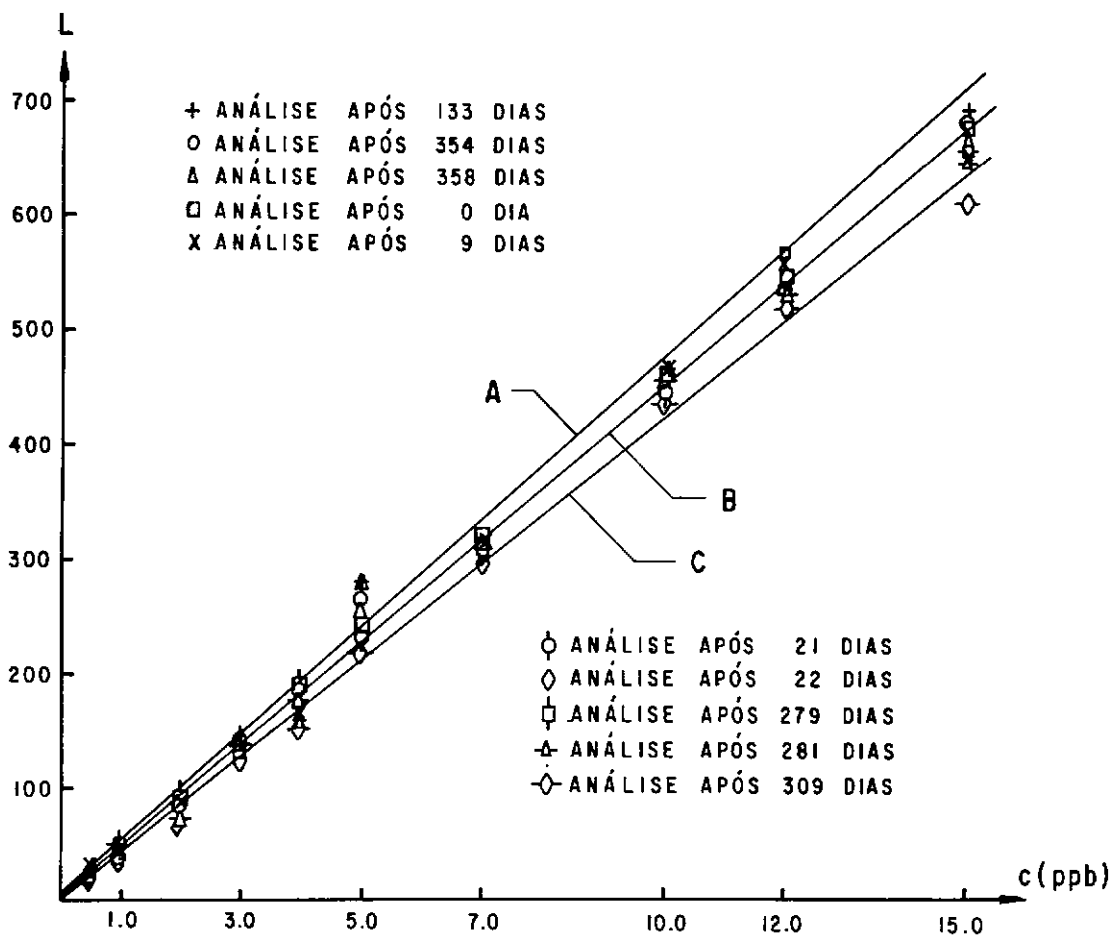


FIGURA 1 - Retas de Calibração com diluente Água destilada

As retas A, B e C, têm respectivamente as seguintes equações:

$$\text{Reta A} \quad C = 0,0214 (L - 4,8) \quad (\text{I})$$

$$\text{Reta B} \quad C = 0,0226 (L - 2,5) \quad (\text{II})$$

$$\text{Reta C} \quad C = 0,0238 L \quad (\text{III})$$

As retas A e C foram consideradas respectivamente como o limite superior e inferior de fluorescência do traçador na ausência completa de sólidos em suspensão, e a reta B representa a fluorescência média do traçador na mesma condição anterior.

As figuras 2, 3 e 4 mostram a variação dos coeficientes angulares das retas de calibração quando foram utilizados respectivamente os seguintes diluentes: esgoto efluente dos tanques de aeração, efluente final do decantador secundário e lodo ativado.

Da análise das figuras citadas, pode-se concluir que a influência dos sólidos em suspensão sobre a fluorescência depende, a priori, da carga de sedimentos em suspensão existente no diluente. A figura 4 parece ratificar esta hipótese, uma vez que o lodo ativado é, dos três diluentes, o que contém maior carga de sedimentos. Mesmo após a decantação de no mínimo 24 horas destes sedimentos, nenhuma das retas consideradas situou-se entre A e C. Isto significa que os sólidos não decantáveis influenciam a fluorescência do traçador, diminuindo-a. A figura 2 mostra que quatro das sete retas analisadas situaram-se entre A e C, enquanto que verifica-se na figura 3 que apenas duas das seis retas de calibração situaram-se entre A e C. Este fato, indica que os sólidos não decantáveis

existentes no efluente final do decantador secundário têm maior influência sobre a fluorescência do que os existentes no esgoto efluente dos tanques de aeração.

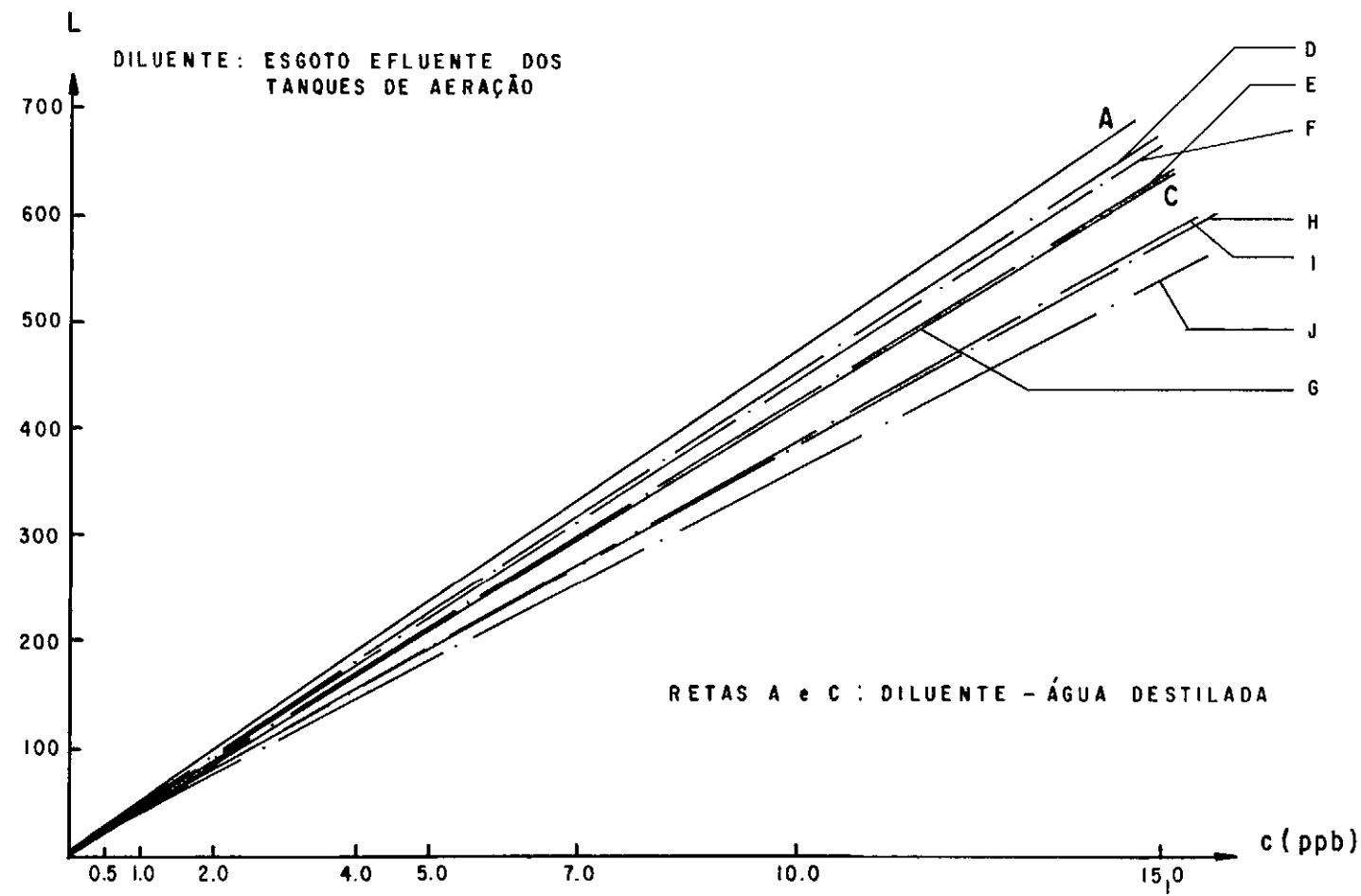


FIGURA 2 - Variação do Coeficiente Angular das Retas de Calibração em Relação às Retas A e C

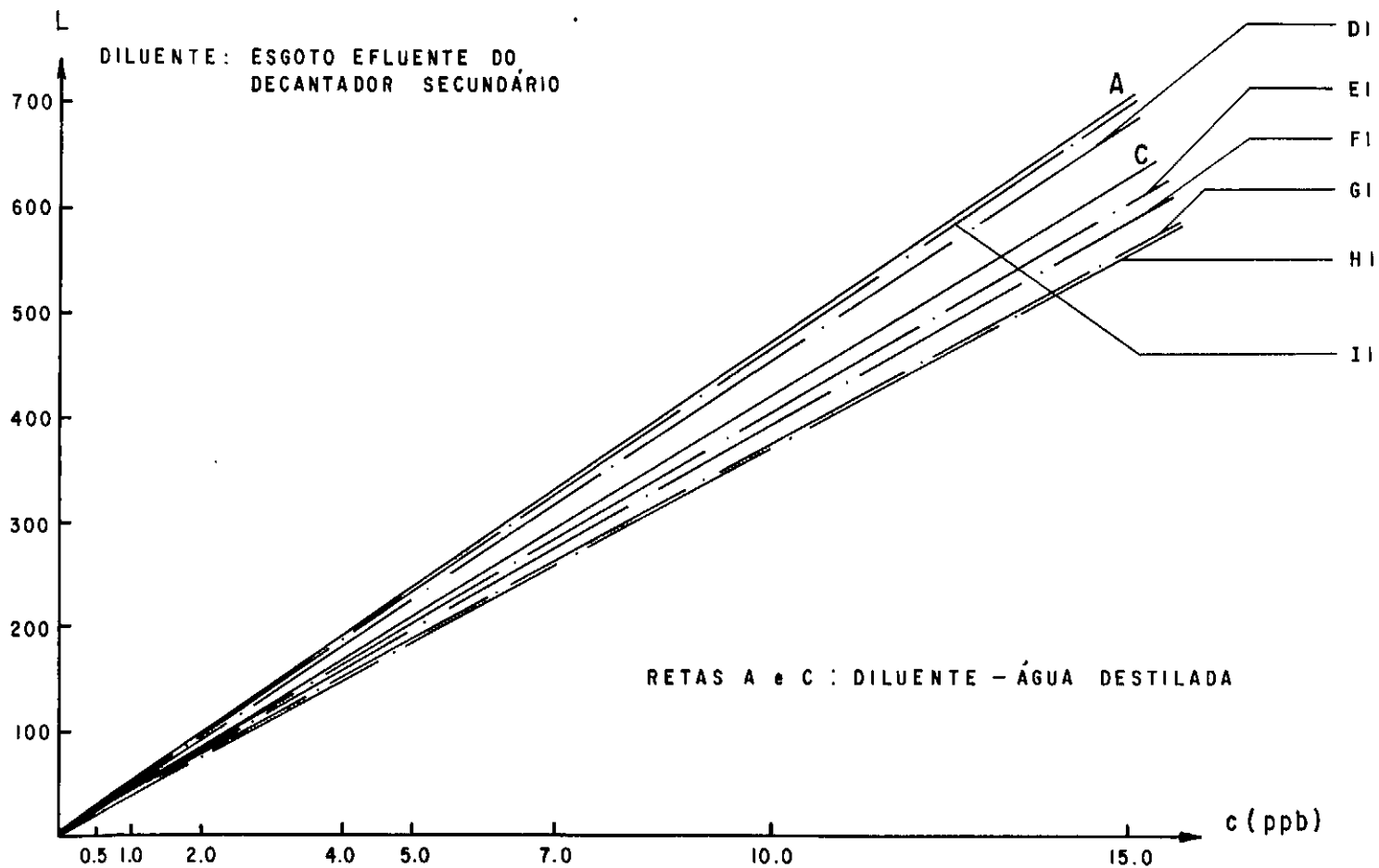


FIGURA 3 - Variação do Coeficiente Angular das Retas de Calibração em Relação às Retas A e C

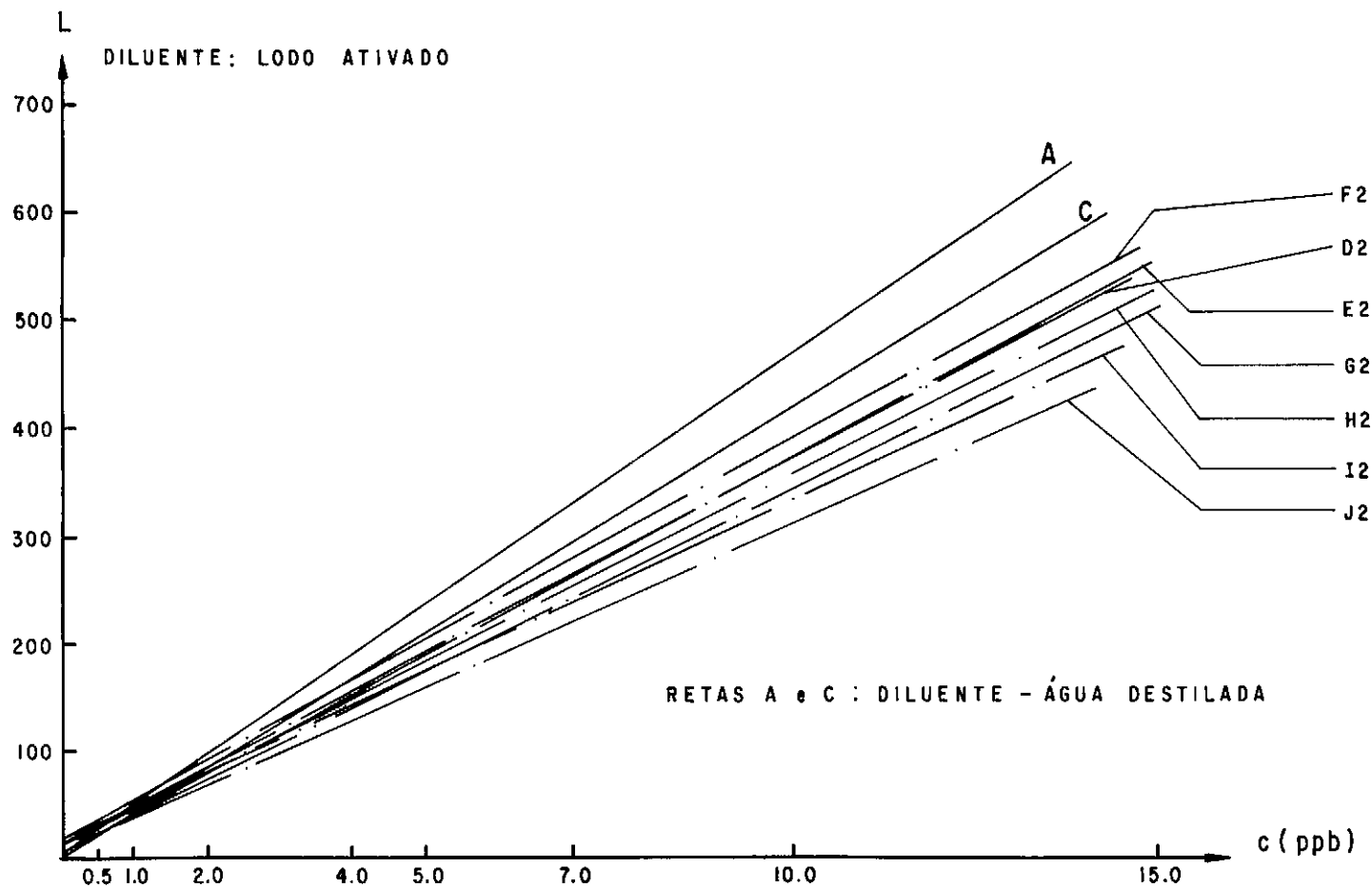


FIGURA 4 - Variação do Coeficiente Angular das Retas de Calibração em Relação às Retas A e C



## APÊNDICE II

ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E FLUORESCÊNCIA  
CIA DE ALGUNS TRAÇADORES

Os espectros de excitação e fluorescência, este também denominado espectro de emissão, são características intrínsecas de cada traçador fluorescente. Espectros, são relações entre os comprimentos de onda de excitação ou fluorescência e as eficiências de excitação ou fluorescência do traçador. Essas relações, normalmente, se traduzem através de curvas de excitação ou fluorescência que têm a forma aproximada de sino.

Os picos destas curvas nos fornecem os comprimentos de onda de excitação e emissão, que proporcionam as máximas eficiências de excitação e fluorescência do traçador analisado.

Para se levantar os espectros de um determinado traçador, basicamente, basta fixarmos um comprimento de onda de excitação - caso se esteja interessado no espectro de fluorescência - ou de fluorescência - caso se esteja interessado em se levantar o espectro de excitação, e variar-se o comprimento de onda o qual não foi fixado. O comprimento de onda que permanece fixo, deve ser sempre inferior aqueles variáveis.

A seguir apresentamos os espectros de excitação e fluorescência dos traçadores: URANINA, RODAMINA B e AMIDORODAMINA G EXTRA.

# ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E FLUORESCENCIA

TRAÇADOR: RODAMINA B

FORNECEDOR: CLAUPA PRODUTOS QUÍMICOS

## LEGENDA:

ESPECTROFLUORIMETRO: JY-3

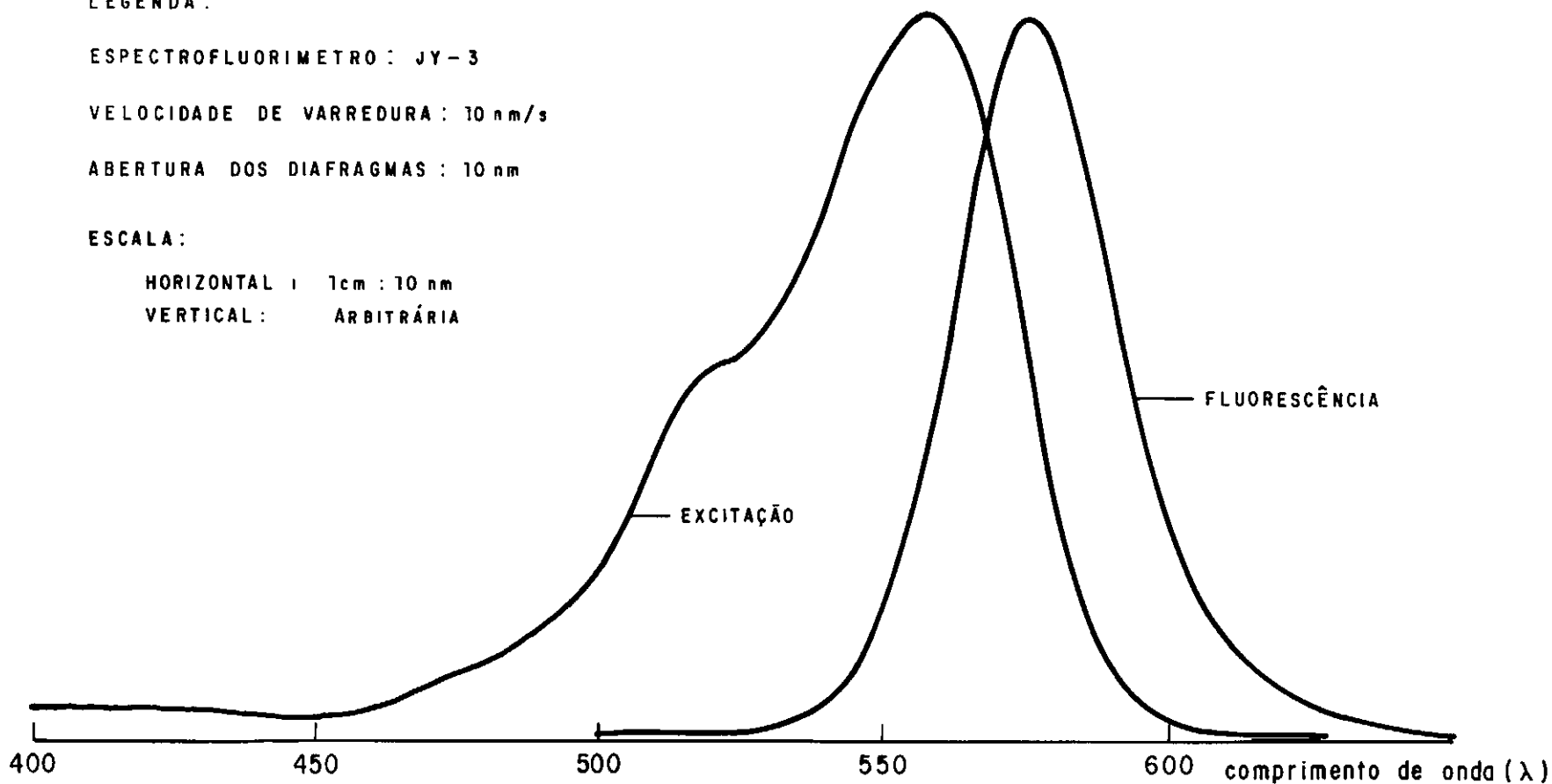
VELOCIDADE DE VARREDURA: 10 nm/s

ABERTURA DOS DIAFRAGMAS: 10 nm

## ESCALA:

HORIZONTAL: 1 cm : 10 nm

VERTICAL: ARBITRÁRIA



# ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E FLUORESCENCIA

TRAÇADOR: URANINA

FORNECEDOR: CLAUPA PRODUTOS QUÍMICOS

## LEGENDA:

ESPECTROFLUORIMETRO: JY-3

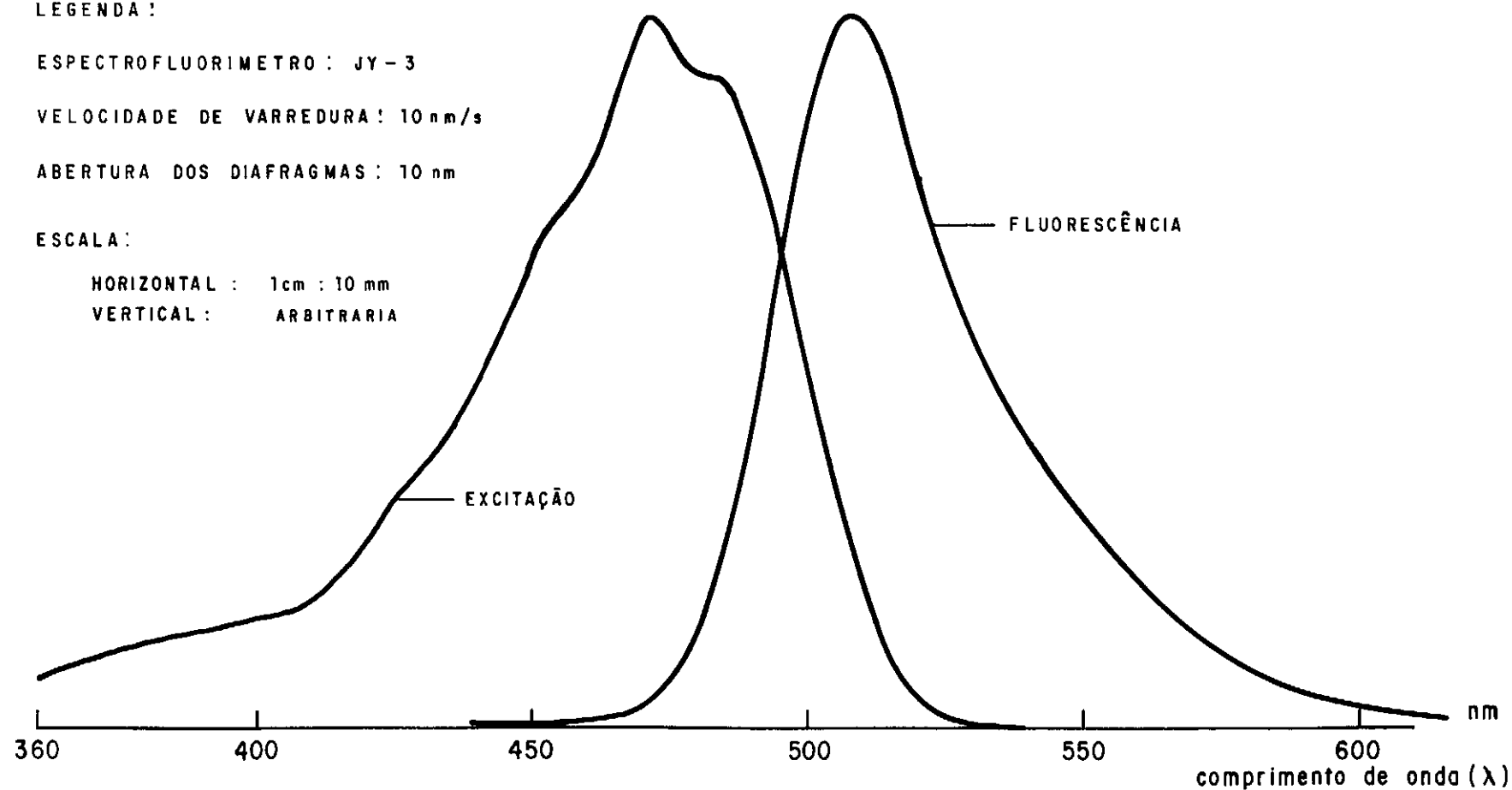
VELOCIDADE DE VARREDURA: 10 nm/s

ABERTURA DOS DIAFRAGMAS: 10 nm

## ESCALA:

HORIZONTAL: 1 cm : 10 nm

VERTICAL: ARBITRARIA



# ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E FLUORESCÊNCIA

TRAÇADOR: AMIDORODAMINA G EXTRA

FORNECEDOR: HOECHST

## LEGENDA:

ESPECTROFLUORIMETRO: JY-3

VELOCIDADE DE VARREDURA: 10 nm/s

ABERTURA DOS DIAFRAGMAS: 10 nm

## ESCALA:

HORIZONTAL: 1 cm : 10 nm

VERTICAL: ARBITRÁRIA

